

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DEL MOLISE
DIPARTIMENTO DI BIOSCIENZE E TERRITORIO



DOTTORATO DI RICERCA IN
SCIENZE E TECNOLOGIE BIOLOGICHE ED AMBIENTALI
XXVIII CICLO

SETTORE SCIENTIFICO DISCIPLINARE: GEO/04

CANDIDATO
LUCA PISANO

*Studio della propensione al dissesto da frana in Molise, con particolare attenzione
ai cambiamenti di copertura del suolo e agli eventi pluviometrici di innesco*

TUTOR:

Prof. Carmen M. Roskopf

COORDINATORE DEL DOTTORATO

Prof. Claudio Caprari

CO-TUTORS:

Prof. Mario Parise

Prof. Giovanna Vessia

Anno Accademico 2015/2016

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Oggetto e finalità della tesi	3
1.2	Concetti generali	7
1.2.1	I fenomeni franosi	7
1.2.2	Principali cause e fattori di controllo	11
1.2.3	Suscettibilità da frana	12
2	Area di studio	19
2.1	Inquadramento geologico regionale.....	20
2.1.1	Geologia del bacino del Torrente Rivo	29
2.2	Inquadramento geomorfologico.....	30
2.2.1	Geomorfologia del bacino del Torrente Rivo	36
2.3	Inquadramento climatico.....	38
3	Dati e metodi	44
3.1	Analisi a scala regionale	44
3.1.1	Preparazione dei dati	45
3.1.2	Metodi utilizzati per l'analisi della suscettibilità da frana	54
3.1.2.1	Il metodo <i>Weight of Evidence</i>	54
3.1.2.2	Il metodo della <i>Logistic Regression</i>	58
3.1.3	Metodo utilizzato per l'analisi dell'esposizione degli elementi a rischio frana	60
3.1.4	Metodo utilizzato per il calcolo dell'indice di malessere demografico (SMD)	61
3.2	Analisi a scala di bacino.....	64
3.2.1	Preparazione dei dati	65
3.2.2	Mappatura multi-temporale della copertura del suolo	69
3.2.2.1	Processamento di foto aeree	69
3.2.2.2	Costruzione omogenea di mappe di copertura del suolo.....	73

3.2.2.3	Analisi dei cambiamenti di copertura del suolo e delle dinamiche di paesaggio attraverso l'utilizzo di indici parametrici	75
3.2.3	Metodo utilizzato per la modellizzazione di scenari futuri di copertura del suolo	76
3.2.4	Mappatura multi-temporale dei fenomeni franosi.....	78
3.2.5	Metodo utilizzato per l'analisi multi-temporale della suscettibilità da frana	81
3.2.6	Metodo e dati utilizzati per la stima del danno agricolo indotto da frane	84
4	Risultati e discussione.....	90
4.1	Risultati ottenuti a scala regionale	90
4.1.1	Mappa di suscettibilità per la regione Molise	90
4.1.1.1	<i>Weight of Evidence</i>	90
4.1.1.2	<i>Logistic Regression</i>	94
4.1.2	Valutazione dell'esposizione degli elementi a rischio da frana e relativa incidenza sullo stato di malessere demografico	100
4.2	Risultati ottenuti a scala di bacino	108
4.2.1	Mappe multi-temporali di copertura del suolo nel bacino del Rivo e stima dei principali cambiamenti.....	108
4.2.2	Scenari futuri di copertura del suolo e stima dei principali cambiamenti	113
4.2.3	Analisi delle variazioni di franosità e stima dei principali cambiamenti	117
4.2.4	Analisi multi-temporale della suscettibilità da frana in relazione al cambiamento di copertura del suolo	127
4.2.5	Stima del danno agricolo indotto da frana	137
5	Le soglie pluviometriche	142
5.1	Stato dell'arte	143
5.1.1	Soglie pluviometriche empiriche	145
5.1.2	Soglie pluviometriche empiriche globali e nazionali	148
5.1.3	Soglie pluviometriche empiriche regionali	151
5.2	Dati e metodologia utilizzati per la costruzione di una soglia pluviometrica molisana-pugliese	152

5.2.1	Raccolta dati e ricostruzione degli eventi pluviometrici innescanti fenomeni franosi	153
5.2.2	Definizione della soglia pluviometrica	159
5.3	Definizione oggettiva dell'evento pluviometrico innescante: un problema aperto.....	165
5.3.1	Validazione di una procedura automatica per la definizione dell'evento pluviometrico innescante	167
5.3.1.1	Database utilizzato per la validazione del metodo automatico	169
5.3.1.2	Confronto statistico tra il metodo automatico e il metodo esperto	170
5.3.2	Risultati e discussioni del processo di validazione	177
6	Conclusioni e prospettive future della ricerca.....	180
	Bibliografia	185

1 Introduzione

Attualmente il rischio idrogeologico è fra le cause principali di variazioni dell'assetto sociale ed economico del nostro Paese. Le condizioni di rischio sono da collegare sia alle caratteristiche geologiche, geomorfologiche e idrografiche del territorio, che all'incremento delle aree urbanizzate, delle aree industriali e delle vie di comunicazione a partire dalla fine del secondo conflitto mondiale, che in molti casi ha avuto luogo in mancanza di una corretta pianificazione territoriale. Tutto questo è stato aggravato spesso dal disboscamento, dall'apertura di cave e dalla mancata manutenzione dei versanti e delle valli fluviali, a cui va aggiunto il mancato rispetto delle legislazioni vigenti che ha portato ad un abusivismo edilizio con punte anche maggiori del 60% in Italia meridionale. Basti pensare che le superfici antropizzate in Italia sono passate dal 2,7% degli anni '50 al 7% nel 2014, con consumo medio del territorio pari a 6-7 metri quadrati al secondo (ISPRA, 2015a).

Per ciò che riguarda i fenomeni franosi in Italia, essi risultano particolarmente diffusi su tutto il territorio nazionale, considerando che esso è caratterizzato per circa il 75% da ambienti collinari e montani. Delle oltre 700.000 frane censite su tutto il territorio Europeo (JRC, 2012), secondo il rapporto dell'Inventario dei Fenomeni Franosi (IFFI), circa 500.000 ricadono nel solo territorio italiano. Nel dettaglio, le frane censite in Italia nell'inventario IFFI, realizzato dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) e dalle Regioni e Province autonome, sono 528.903 e occupano il 7,3% dell'intero territorio nazionale con un'estensione pari a circa 22176 Km² (Trigila et al., 2010, 2014; Trigila e Iadanza, 2012; Spizzichino et al., 2013).

Fra l'anno 843 e il 2013, le frane hanno causato in Italia almeno 17.498 vittime (morti, dispersi, feriti) e tra il 1950 e il 2013, almeno 6462 vittime (morti, dispersi, feriti). A questi si sono aggiunti nel 2014, altri 13 morti, 25 feriti e 3368 persone che hanno dovuto abbandonare temporaneamente le loro abitazioni (fonte CNR-IRPI, sito <http://polaris.irpi.cnr.it/>).

La regione Molise con le sue 22527 frane riportate nell'inventario IFFI, che coprono all'incirca l'11,14% dell'intero territorio regionale (Roskopf e Aucelli, 2007), risulta essere tra le regioni italiane maggiormente interessate da fenomeni franosi in termini di densità per km². La maggior parte dei fenomeni franosi mappati all'interno del territorio molisano risulta avere un cinematismo di tipo colata con movimento lento, subordinatamente sono stati censiti fenomeni rientranti nelle tipologie complesse e di tipo scivolamento rotazionale/traslattivo. A causa del cinematismo generalmente lento, i movimenti franosi che colpiscono la regione non provocano usualmente vittime, ma colpiscono in maniera grave il tessuto urbano con danni ingenti sia alle infrastrutture pubbliche che private. Tra gli esempi più eclatanti troviamo la frana di Petacciato

(CB), che è stata caratterizzata negli anni da numerose riattivazioni creando periodicamente notevoli disagi per il traffico strategico nazionale, precludendo in molti casi la circolazione dell'autostrada A24 e della adiacente linea ferroviaria, creando enormi conseguenze socio-economiche (Cotecchia et al., 2011; Doglioni et al, 2012). Un altro noto esempio è quello della frana occorsa in località Covatta, nel comune di Ripalimolisan (CB), un fenomeno complesso di grandi dimensioni che nel 1996 sbarrò completamente il corso fluviale del Biferno bloccando inoltre una delle arterie di comunicazione principale dell'intera regione, la strada statale 647 detta "Fondovalle del Biferno". Molto recentemente, una frana verificatasi nel marzo del 2015 nel comune di Trivento (CB) ha provocato l'isolamento di 8 famiglie, mentre un'altra verificatasi nell'ottobre del 2015 a Sesto Campano (IS) è stata la causa dell'evacuazione di diverse famiglie.

Dato l'ingente numero di fenomeni franosi che sono avvenuti negli ultimi decenni in Italia e nel resto del mondo, si è sviluppata un'estrema sensibilità rispetto alla tematica dei fenomeni franosi, il che ha arricchito notevolmente il patrimonio di conoscenze dirette. Difatti, nell'ambiente scientifico si sono notevolmente duplicati lavori basati sulla tematica della prevenzione e previsione del rischio da frana e sull'attuazione di interventi diretti e indiretti in grado di ridurre l'impatto generato dagli eventi franosi sulla popolazione. Diventa evidente come la determinazione della pericolosità da frana costituisce in un territorio come quello molisano, una base indispensabile per la predisposizione di interventi di pianificazione territoriale e per la prevenzione di dissesti futuri.

Per pericolosità da frana si intende la probabilità di occorrenza di un fenomeno franoso potenzialmente dannoso, di una determinata intensità, in un specifico periodo e in una data area (Varnes, 1984). La maggiore criticità nell'analisi della pericolosità da frana deriva generalmente dalla mancanza di informazioni certe, relative alle date di attivazione dei fenomeni. Questo implica dunque, un'oggettiva difficoltà di determinare il tempo di ricorrenza delle frane. A causa di queste limitazioni, l'analisi più comunemente effettuata è quella della suscettibilità, che consente di individuare le porzioni di territorio a maggiore probabilità di accadimento di frane (Trigila et al., 2015).

L'analisi della suscettibilità, seppur anch'essa di difficile realizzazione, può essere un utile strumento per la previsione di frana sulla base delle condizioni locali, quali l'assetto morfologico e geologico e la copertura del suolo, oltre a rappresentare un'utile base per interpretare statisticamente tutti gli elementi che predispongono al dissesto.

Questa analisi permette dunque di identificare e delimitare le aree maggiormente soggette ad uno specifico fenomeno tramite l'investigazione delle origini e dei fattori che creano la propensione al dissesto del territorio agli stessi fenomeni franosi.

Un altro strumento tra quelli più richiesti dalle amministrazioni pubbliche competenti, risulta essere quello dei modelli previsionali in grado di fornire informazioni utili e tempestive al fine di supportare le decisioni nel corso di attività di emergenza.

In Italia le piogge intense e prolungate sono tra le principali cause d'innescò dei fenomeni franosi, i quali provocano ogni anno vittime, danni alle infrastrutture pubbliche e private, danni all'ambiente e gravi perdite economiche (Salvati et al., 2010). Detto ciò con l'attività di ricerca negli ultimi decenni si è assistito ad un progressivo sviluppo, sia in ambito nazionale che internazionale, di modelli per la definizione di soglie pluviometriche per l'innescò di fenomeni franosi.

In questo primo capitolo, in relazione a quanto precedentemente detto, verranno dunque illustrate le finalità e le varie fasi del progetto di ricerca, nonché i concetti generali e lo stato d'arte acquisiti attraverso l'analisi bibliografica sul tema di ricerca trattato.

1.1 Oggetto e finalità della tesi

Il progetto di ricerca si focalizza sull'analisi multi-temporale della distribuzione dei fenomeni franosi, ponendo particolare attenzione alle influenze esercitate dai cambiamenti delle coperture del suolo, e sull'identificazione di soglie pluviometriche per valutare il ruolo delle precipitazioni come fattore d'innescò delle frane. Il progetto di ricerca e le sue fasi di lavoro sono schematizzati e illustrati nel "*flow chart*" in Figura 1.1-1, che ripercorre il flusso del lavoro svolto. Nel *flow chart* sono schematizzati i principali temi trattati, dove il primo punto riguarda un'analisi di suscettibilità a scala regionale con conseguente valutazione dell'influenza sugli aspetti demografici associati, un secondo punto vuole valutare come le coperture del suolo non possano essere ritenute costanti nel tempo nella creazione di mappe di suscettibilità da frana, e infine un terzo punto è stato quello di definire una soglia pluviometrica empirica per l'area molisana-pugliese per l'innescò di fenomeni franosi superficiali.

In un primo momento sono state realizzate più mappe di suscettibilità a scala regionale che hanno permesso da un lato di caratterizzare statisticamente la propensione al dissesto da frana sull'intero territorio regionale, e dall'altra hanno dato modo di individuare le aree più propense al dissesto. A seguito di queste analisi, è stata portata avanti un'analisi dell'esposizione di tali elementi a rischio, con lo scopo di analizzare in maniera preliminare la severità con cui la presenza di fenomeni franosi interagisce in termini di probabilità spaziale con le zone abitate e le vie di comunicazione. Si è valutata successivamente l'eventuale incidenza di tale esposizione sulle dinamiche della popolazione (in termini di malessere o emigrazione), attraverso il calcolo

di un indicatore demografico denominato SMD (stato di malessere demografico) (Bottazzi et al., 2006; Bottazzi e Puggioni 2013).

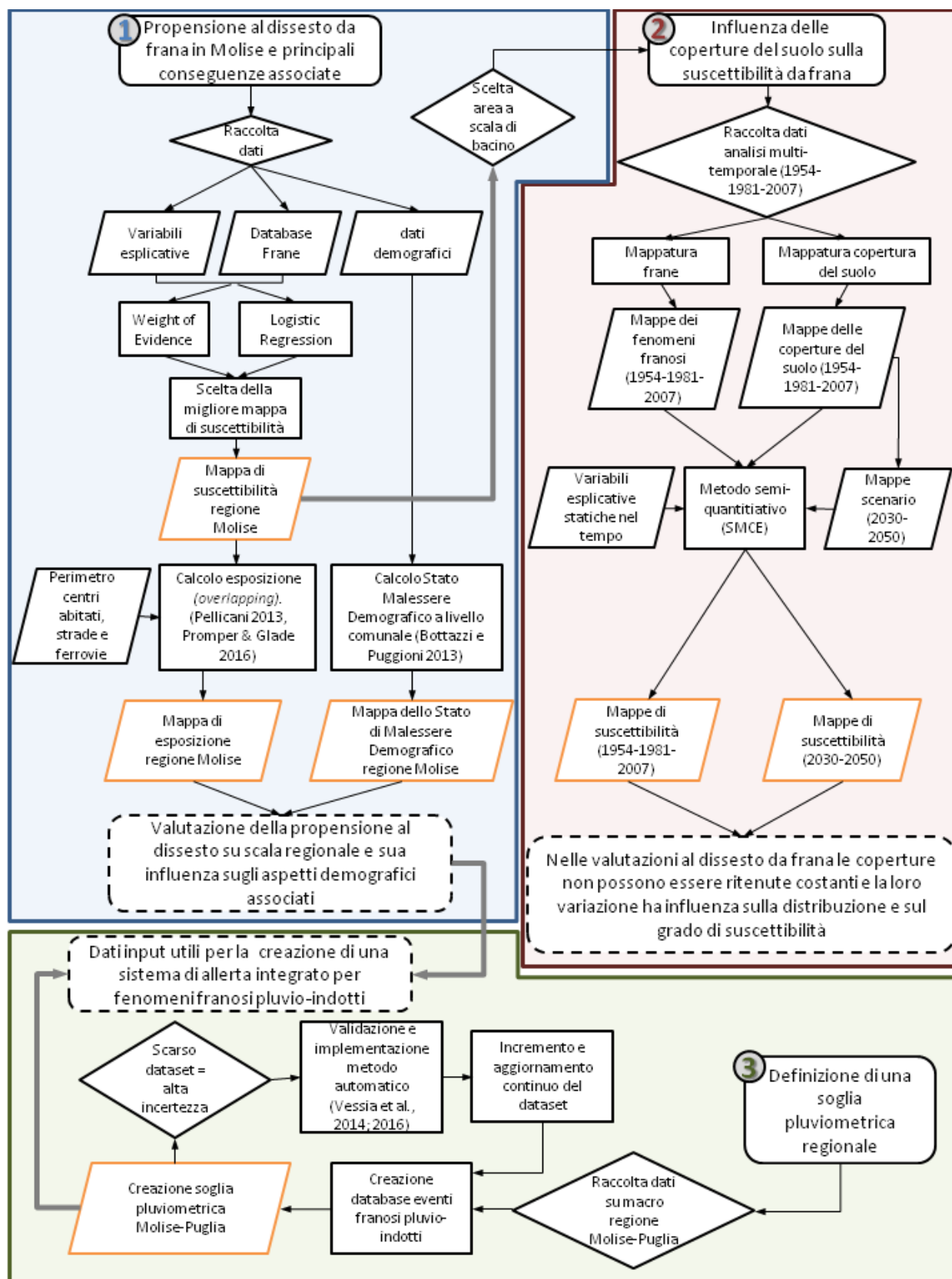


Figura 1.1-1 Schema riassuntivo del flusso di lavoro svolto

A seguito delle valutazioni a scala regionale, si è individuata un'area, quella del bacino idrografico del Torrente Rivo (Provincia di Campobasso), che in relazione alle sue caratteristiche morfodinamiche, climatiche, geo-pedologiche e socio-economiche, è rappresentativa dell'assetto e delle criticità del territorio del settore medio-alto collinare del versante adriatico molisano.

Per il bacino del Rivo è stato realizzato uno studio dei fenomeni franosi e delle loro condizioni ambientali di sviluppo, focalizzando l'attenzione sull'analisi delle variazioni spaziali in relazione ai cambiamenti delle coperture del suolo passate, e dei possibili ulteriori cambiamenti in futuro.

Nell'ambito del progetto di ricerca un aspetto fondamentale è stato quello di verificare se e come i cambiamenti di copertura del suolo avvenuti in un determinato territorio negli ultimi 60 anni, possano aver influito sulla distribuzione spaziale e temporale dei fenomeni franosi, e dunque sulla propensione al dissesto del territorio. Difatti, la distribuzione spaziale e temporale dei fenomeni franosi è influenzata dalle condizioni meteo-climatiche, dalle coperture e usi del suolo e dalle caratteristiche ambientali intrinseche, tra cui la topografia, la morfologia, l'idrologia e la litologia del territorio (Begueria, 2006; García-Ruiz et al., 2013). Mentre però i fattori geologici e geomorfologici subiscono cambiamenti su scala temporale ampia, le variazioni di copertura del suolo possono avvenire in maniera sostanziale e rapida, anche nel corso di pochi decenni (Reinchenbach et al., 2014).

I cambiamenti di uso e di copertura del suolo rappresentano alterazioni molto importanti del paesaggio dovute a complesse interazioni socio-economiche e ambientali (Forman, 1995; Lambin et al., 2001). Infatti, il paesaggio cambia in attività e strutture con un dinamismo molto rapido, come risposta ai cambiamenti economici, politici e sociali indotti ad un territorio (Dunn et al., 1991). In Italia, questi cambiamenti si sono maggiormente accelerati successivamente alla seconda guerra mondiale, in relazione all'aumento dell'industrializzazione e dell'urbanizzazione associato ad un abbandono delle aree rurali collinari e montane (Antrop, 2004; Mazzoleni et al., 2004). In particolar modo, nell'area appenninica il più comune effetto è stato quello dell'espansione perlopiù delle foreste, con significativi cambiamenti soprattutto delle aree a cespuglieto e della distribuzione/estensione delle aree urbanizzate, e un corrispettivo aumento delle aree agricole e delle aree di allevamento di bestiame in aree più favorevoli, al fine di massimizzare la produzione di cibo e abbattere i relativi costi (Agnoletti, 2007; Falcucci et al., 2007; Pelorosso et al., 2011; Bracchetti et al., 2012). Difatti si è potuto notare come nel corso degli ultimi 60 anni ci sia stato uno sfruttamento maggiore delle aree più redditizie, quali ad esempio le aree pianeggianti e costiere, a discapito delle aree agricole o dedite all'allevamento poste nelle zone rurali collinari e di montagna.

La comprensione dei principali cambiamenti di copertura del suolo nel tempo può essere molto utile per valutare il ruolo della copertura del suolo su pendii propensi a frane superficiali (Glade, 2003; Reichenbach et al., 2014; Carone, 2015). Alcuni lavori hanno inoltre sottolineato che la presenza di rischi ambientali, dovuta ad esempio alle frane in aree agricole, può rappresentare una importante minaccia per la sicurezza umana, creando una maggiore difficoltà nella gestione del territorio che porta conseguentemente a possibili migrazioni della popolazione e abbandono delle terre (Warner et al., 2010; Piguet, 2013). In molti casi, i cambiamenti di uso del suolo, specialmente se collegati all'abbandono di aree coltivate, hanno portato ad un aumento della franosità (Lorente et al., 2002; Glade, 2003; Begueria, 2006; Galve et al., 2015; Persichillo et al., 2017).

In particolare, Lorente et al. (2002) e Begueria (2006), studiando una zona estremamente degradata dei Pirenei centrali, hanno verificato che a seguito della migrazione dell'agricoltura su pendii ripidi e al frequente uso del fuoco per controllare l'espansione della vegetazione spontanea, si è avuto un aumento considerevole dell'erosione del suolo e il successivo abbandono dei terreni. Questa situazione ha contribuito fortemente all'occorrenza di frane superficiali, anche decenni dopo che le attività umane agricole erano cessate lungo tali pendii. Altri autori (Crosta et al., 2003; Cevasco et al., 2014; Galve et al., 2015) hanno mostrato come l'abbandono di aree coltivate e la successiva mancanza di manutenzione attraverso la realizzazione di strutture antropiche, come canali di drenaggio, muri di sostegno etc., hanno portato in diverse zone collinari delle Alpi e degli Appennini ad un aumento considerevole dell'instabilità dei versanti.

Per l'area di studio scelta si è provveduto a realizzare delle mappe di suscettibilità da frana multi-temporali, andando ad indagare come la variazione di copertura del suolo abbia influenzato la distribuzione della propensione al dissesto, e con l'ausilio di scenari futuri di cambiamento di copertura del suolo sono state prodotte differenti mappe-scenario di suscettibilità.

Inoltre per la stessa area si è stimato il possibile deprezzamento in termini economici dei terreni agricoli già interessati da fenomeni franosi, o che sulla base di analisi di suscettibilità da frana potrebbero esserne interessati in futuro. L'importanza di stimare un danno agricolo prodotto da frane è data dal fatto che per la regione Molise circa il 60% dei fenomeni franosi censiti a livello regionale (APAT, 2007) ricade in terreni agricoli, il 32% in terreni boschivi, mentre solo lo 0,2% in aree urbanizzate (Aucelli et al., 2008). Seguendo questo criterio il danno agricolo non può essere solo stimato per le frane esistenti ma deve essere caratterizzato anche per la propensione che un terreno può avere al dissesto da frana.

L'attività di ricerca si è arricchita anche grazie alla collaborazione con l'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IRPI), Sede

Secondaria di Bari. Tale collaborazione ha permesso in particolare di valutare il ruolo delle precipitazioni come fattore d'innescò di fenomeni franosi (Guzzetti et al., 2007, 2008) attraverso la realizzazione di soglie pluviometriche sulla base dell'elaborazione delle segnalazioni di eventi di frane avvenute in concomitanza di eventi pluviometrici, quindi pluvio-indotte, che sono state raccolte per il territorio pugliese, e più specificatamente per la provincia di Foggia. La vicinanza geografica tra la provincia di Foggia e la regione Molise e le caratteristiche morfologiche, geografiche e climatiche molto simili dei loro settori collinari e montani, hanno permesso di estendere l'analisi anche al territorio molisano, in modo da creare una soglia pluviometrica comune, applicabile dunque anche nell'area oggetto di studio di questo progetto di ricerca.

La creazione di soglie pluviometriche per l'innescò di frane superficiali e la loro integrazione con carte di suscettibilità da frana, può rappresentare un importante supporto per le autorità coinvolte (Segoni et al., 2015), nella gestione del rischio da frana in Molise (quali ad esempio Protezione Civile e Autorità di Bacino), che andrebbero ad integrare la loro conoscenza del territorio con informazioni ancora non sviluppate per la regione stessa. Tali dati consentirebbero di sviluppare un sistema di allerta da frana indotta da eventi pluviometrici, al momento non previsto per questo tipo di calamità naturali nel territorio oggetto di studio.

1.2 Concetti generali

Nei seguenti sottoparagrafi verranno brevemente descritti i concetti generali in relazione agli argomenti trattati nel lavoro di tesi, facendo riferimento alla bibliografia esistente in materia. Verrà dunque riportata la classificazione dei fenomeni franosi (par. 1.2.1), le principali cause e fattori di innescò (par. 1.2.2), e i metodi più comuni per la costruzione di mappe di suscettibilità da frana (par. 1.2.3).

I concetti generali inerenti la definizione di soglie pluviometriche innescanti fenomeni franosi, verranno trattati in maniera compiuta e dettagliata nel capitolo 5.

1.2.1 I fenomeni franosi

Le frane sono definite come il movimento di una massa di roccia, detrito, o terra lungo un versante, sotto l'influenza della gravità (Cruden e Varnes, 1996; Hungr et al., 2014). Vista la varietà dei processi di innescò, del tipo di movimento e dei materiali coinvolti, le frane sono definite come fenomeni molto complessi e di non semplice caratterizzazione. Nell'ambito scientifico si è dunque da sempre avuta l'esigenza di classificare i fenomeni franosi

contraddistinguendoli in base a caratteristiche comuni presenti nelle determinate tipologie. Il sistema di classificazione più largamente utilizzato nel linguaggio scientifico, è stato ideato da D.J. Varnes nel 1978. L'autore differenzia le frane a secondo del tipo di movimento e del materiale coinvolto. Nella letteratura scientifica così come riportato in Hungr et al. (2014), esistono altre classificazione che tengono conto di altre variabili quali, ad esempio, i parametri geotecnici, il contenuto di fase fluida o in generale le proprietà meccaniche dei terreni (Hutchinson, 1988; Mongerster 1992; Leroueil et al., 1996; Hungr et al., 2001).

Nel dettaglio la classificazione di Varnes (1978) descrive i principali tipi di frana suddividendoli in sei tipi di movimento (Figura 1.2-1), che vengono dall'autore ulteriormente distinti in base ai tipi differenti di materiali (roccia, detrito e suolo).

I sei tipi di movimento sono:

- Crolli (*Falls*)
- Ribaltamenti (*Topples*)
- Scivolamenti (*Slides*)
- Colate (*Flows*)
- Espandimenti laterali (*Lateral spreads*)
- Frane complesse (*Complex*)

TYPE OF MOVEMENT		TYPE OF MATERIAL	
		BEDROCK	ENGINEERING SOILS
			Predominantly coarse Predominantly fine
FALLS		Rock fall	Debris fall Earth fall
TOPPLES		Rock topple	Debris topple Earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	Rock slide	Debris slide Earth slide
	TRANSLATIONAL		
LATERAL SPREADS		Rock spread	Debris spread Earth spread
FLOWS		Rock flow	Debris flow Earth flow
		(deep creep)	(soil creep)
COMPLEX		Combination of two or more principal types of movement	

Figura 1.2-1 Tipi di frane. Versione abbreviata della classificazione di Varnes 1978 dei movimenti di versante estratta dal sito <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/>

I crolli vengono definiti come il distacco da una superficie molto inclinata, di materiale di suolo o roccia lungo discontinuità meccaniche esistenti nell'ammasso roccioso. La velocità del movimento è in genere molto elevata e il movimento della massa in frana avviene in caduta libera, con eventuali successivi rimbalzi o rotolamenti.

Simili ai crolli sono i ribaltamenti (Figura 1.2-1), dove però si verifica la rotazione di una massa attorno ad un punto di rotazione situato al di sotto del baricentro della stessa.

Gli scivolamenti sono caratterizzati dal movimento di una massa coerente, o limitatamente deformata al suo interno, lungo una superficie di rottura o una zona di taglio ben definita. All'interno di questa tipologia Varnes (1978) differenzia due tipologie di geometrie, gli scivolamenti rotazionali e gli scivolamenti traslativi. Nei primi la superficie di rottura/distacco viene descritta come ricurva verso l'alto, con la parte alta caratterizzata da una componente essenzialmente verticale che in basso cambia fino a raggiungere eventualmente anche l'orizzontalità. Gli scivolamenti traslativi avvengono invece su superfici di rottura o fratture pressoché piane, le cui condizioni più favorevoli sono le stratificazioni a franapoggio o un contatto tra suolo-roccia oppure tra strati a litologia diversa, parallelo all'andamento del versante.

Gli espandimenti laterali sono spesso legati a fenomeni di liquefazione o a deformazioni plastiche del materiale sottostante alla superficie di rottura. Sono dunque movimenti a prevalente componente orizzontale e si innescano su versanti caratterizzati da un basso gradiente.

Le colate sono definite come movimenti franosi caratterizzati da un'elevata deformazione interna della propria massa. Sono caratterizzate dal movimento indipendente delle varie parti che compongono il fenomeno e la sua velocità può variare da molto lenta a estremamente veloce, essendo in stretta dipendenza con le dimensioni della massa che alimenta il fenomeno, con il gradiente del versante e con il grado di saturazione dei terreni coinvolti. A loro volta le colate vengono differenziate in differenti categorie a seconda di precise caratteristiche che di seguito sono brevemente descritte: i flussi di roccia (*rock flow*), caratterizzati da deformazioni diffuse di rocce intensamente fratturate; le colate di detrito (*debris flow*), il cui movimento molto rapido di materiale grossolano, in parte saturo, si mobilita su versanti ad alto gradiente e tende ad incanalarsi lungo vie preferenziali, depositandosi laddove le pendenze si riducono notevolmente; le colate di terra (*earth flow*), caratterizzate da un aumento della matrice argillosa rispetto alla frazione grossolana detritica, e che possono innescarsi in pendii anche a ridotta pendenza, con velocità inferiore rispetto a quella che può essere raggiunta dalle colate detritiche; le colate di fango (*mud flow*), caratterizzate da una grande quantità di frazione liquida e subordinatamente da materiale prevalentemente fine, che porta la massa in movimento ad essere caratterizzata anche da elevata velocità, e che tendono ad incanalarsi lungo le incisioni fluviali.

L'ultima tipologia descritta da Varnes (1978) è quella complessa. Questa è data dalla combinazione di due o più dei cinque principali tipi di frana precedentemente descritti. La loro combinazione può avvenire sia nello spazio che nel tempo e generalmente un tipo di movimento predomina parzialmente o temporaneamente sugli altri.

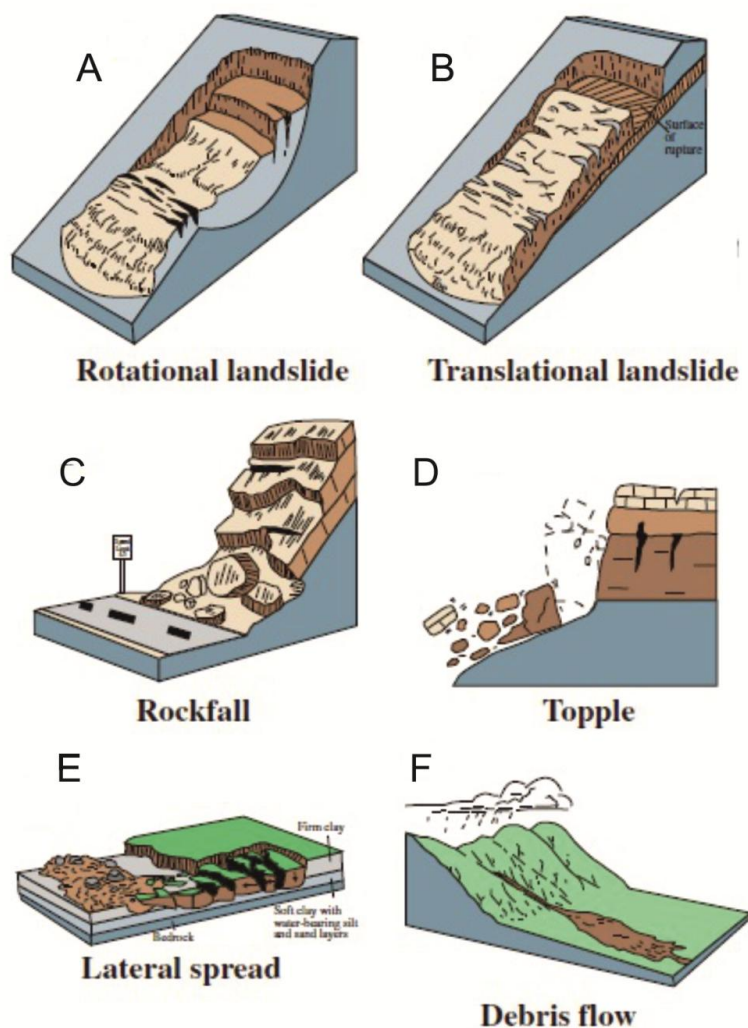


Figura 1.2-1 Rappresentazione schematica di alcuni tipi di movimenti franosi inclusi nella classificazione di Varnes (1978): A) scivolamento rotazionale; B) scivolamento traslativo; C) crollo; D) ribaltamento; E) espandimento laterale; f) colata di detrito (Highland et al., 2008).

Per quel che riguarda la nomenclatura del corpo di frana, Cruden e Varnes (1996), identificano due parti distinte: zona di deplezione o distacco (*zone of depletion*) e una zona di deposito o accumulo (*zone of accumulation*) (vedi Figura 1.2-2). La zona di distacco è caratterizzata dalla presenza della superficie di rottura (*surface of rupture*), dalla scarpata principale (*main scarp*) e da due fianchi destri e sinistri (*right e left flank*) su cui si incanala il corpo di frana. La zona di deposito è caratterizzata dalla presenza di gran parte del materiale mobilizzato all'interno del quale si può riscontrare una superficie di separazione tra la il materiale mobilizzato e il sottostante terreno preesistente, oltre a diversi tipi di fratture (*cracks*). Dalla Figura 1.2-2 si evince inoltre come morfologicamente le frane siano caratterizzate da una morfologia concava nella zona di distacco e da una morfologia convessa lungo la zona di transito e accumulo. Per maggiori dettagli si fa riferimento al contributo scientifico proposto da Cruden e Varnes 1996.

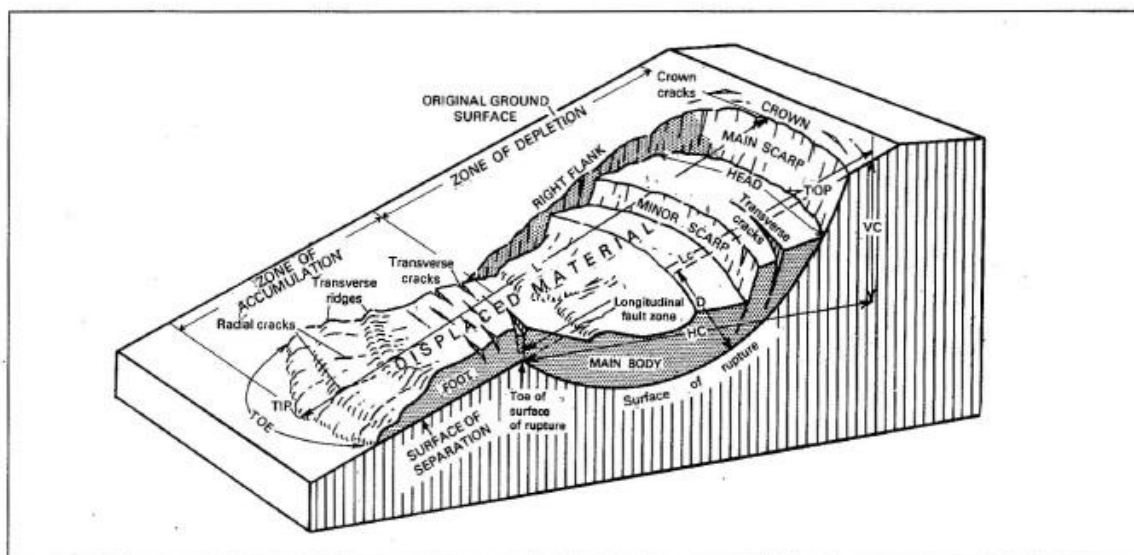


Figura 1.2-2 Nomenclatura di una frana tratta da Cruden e Varnes, 1996.

1.2.2 Principali cause e fattori di controllo

Un movimento franoso si innesca essenzialmente quando la forza di gravità supera la resistenza al taglio del materiale che costituisce un versante o una porzione di esso. Le cause che conducono al prevalere della forza di gravità sulle forze di resistenza possono essere molteplici e complesse. Tali cause possono essere distinte in due categorie, cause predisponenti e cause innescanti (scatenati).

I fattori predisponenti sono riconducibili sia a condizionali naturali (e.g. geologia, geomorfologia, tessitura del materiale) che antropiche.

Tra i fattori geologici predisponenti particolare importanza è legata alla litologia caratterizzante il pendio. Le proprietà meccaniche dell'ammasso difatti, dipendono dalla composizione dei litotipi, dal quadro giaciturale degli strati e dall'influenza della tettonica sui litotipi.

I fattori geomorfologici sono considerati anch'essi tra i principali fattori predisponenti del versante. Difatti pendenze più ripide favoriscono l'azione della gravità così come la forme intrinseche, quali curvatura o energia del rilievo del versante, possono influenzare le dinamiche idrologiche di infiltrazione e la circolazione idrica sotterranea.

Qualora i fattori naturali predispongano alla stabilità dei versanti, i fattori antropici possono essere causa diretta o indiretta della variazione delle condizioni verso l'instabilità. Ad esempio, operazioni di scavo nel sottosuolo in determinate parti del versante, tagli stradali alla base o nelle aree intermedie del pendio, così come carichi puntuali e/o distribuiti legati alla costruzione di manufatti, possono risultare destabilizzanti e agire come fattori predisponenti l'innescare dei

fenomeni franosi. Inoltre, come riferito nel paragrafo precedente, tra le altre cause antropiche riconosciute, possono giocare un ruolo determinante i cambiamenti nella copertura e nell'uso del suolo derivante da attività umane come la deforestazione (Figura 1.2-3), la costruzione di strade, gli incendi e la coltivazione su pendii ripidi (Cannon, 2001; Glade, 2003; Crozier et al., 2010).



Figura 1.2-3 Evidenza del contrasto di distribuzione delle frane tra aree boscate e aree sottoposte a pascolo create a seguito di disboscamento antropico in Nuova Zelanda (da Crozier et al., 2010). Foto Graham Hancox.

Le cause d'innescò, sono tutte quelle condizioni che rappresentano una situazione aggravante in una situazione di equilibrio limite derivante da determinate condizioni dei fattori predisponenti sopracitati. Dunque con fattore innescante si intende un processo repentino e episodico che causa un aumento delle forze destabilizzanti o un decremento delle forze resistenti associate ai materiali coinvolti al punto da causare la frana. Le cause scatenanti più comuni possono essere dunque legate ad eventi pluviometrici intensi o prolungati, a un rapido scioglimento della neve, a terremoti, ad eruzioni vulcaniche, a fenomeni di gelo e disgelo.

1.2.3 Suscettibilità da frana

La suscettibilità da frana è la prima fase dell'analisi finalizzata alla valutazione della pericolosità (*hazard*). Come descritto in Cascini (2008) e Fell et al., (2008), la pericolosità è il risultato della mappatura della suscettibilità, cui viene assegnata una frequenza stimata (probabilità annua) per le potenziali aree in frana. Gli autori definiscono la pericolosità come una probabilità che un certo evento si verifichi in un determinato intervallo di tempo, che sia contraddistinta dunque da un'intensità a cui è associata una magnitudo, espressa come volume di

materiale coinvolto che si estende su una superficie e ad una certa velocità, variabile a seconda delle diverse tipologie di frane.

Le carte di pericolosità sono a loro volta alla base della zonazione del rischio da frana, difatti il rischio valuta il potenziale danno a persone (probabilità annua di perdite di vite umane), ai beni (valore annuale di perdita di proprietà), e agli aspetti ambientali, in ragione della probabilità temporale e spaziale, e della vulnerabilità (Cascini, 2008; Fell et al., 2008). Gli autori infatti intendono per rischio una misura di probabilità e severità di un effetto nocivo per la salute, per le proprietà e per l'ambiente. Esso è spesso stimato come il prodotto della probabilità di un fenomeno di una data magnitudo per le conseguenze.

In letteratura il rischio viene dunque definito dalla seguente equazione:

R= pericolosità (*hazard*) X vulnerabilità (*vulnerability*) X elementi a rischio (*elements at risk*)

Nella Figura 1.2-4 (da van Westen et al., 2008) gli autori danno una schematizzazione dei principali livelli di dati richiesti per la valutazione della suscettibilità, della pericolosità e del rischio da frana.

In relazione allo scopo del progetto di ricerca, di seguito verranno esplicitate con maggior dettaglio le caratteristiche e i metodi più comuni utilizzati in letteratura per la costruzione di mappe di suscettibilità.

La suscettibilità da frana può essere definita come la probabilità di occorrenza di eventi di frana in una determinata area, sulla base delle condizioni geologico-ambientali locali (Soeters e Van Westen, 1996; Guzzetti et al., 2005; Fell et al., 2008). Guzzetti et al. (1999) partono difatti dall'assunzione che le frane che occorreranno in futuro saranno caratterizzate dalle stesse condizioni di innesco delle frane accadute in passato, e dunque la valutazione della suscettibilità può essere usata per predire la localizzazione geografica delle frane future. Inoltre Guzzetti et al. (2005) sottolineano come una mappa di suscettibilità da frana non sia una mappa previsionale del “come” e “quando” una frana occorrerà o del “quanto” sarà grande e distruttiva, ma che stima solamente il grado di stabilità di un versante rispetto ad un altro, non esprimendo alcun dato riguardo la probabilità di occorrenza dei fenomeni in termini assoluti o in termini temporali.

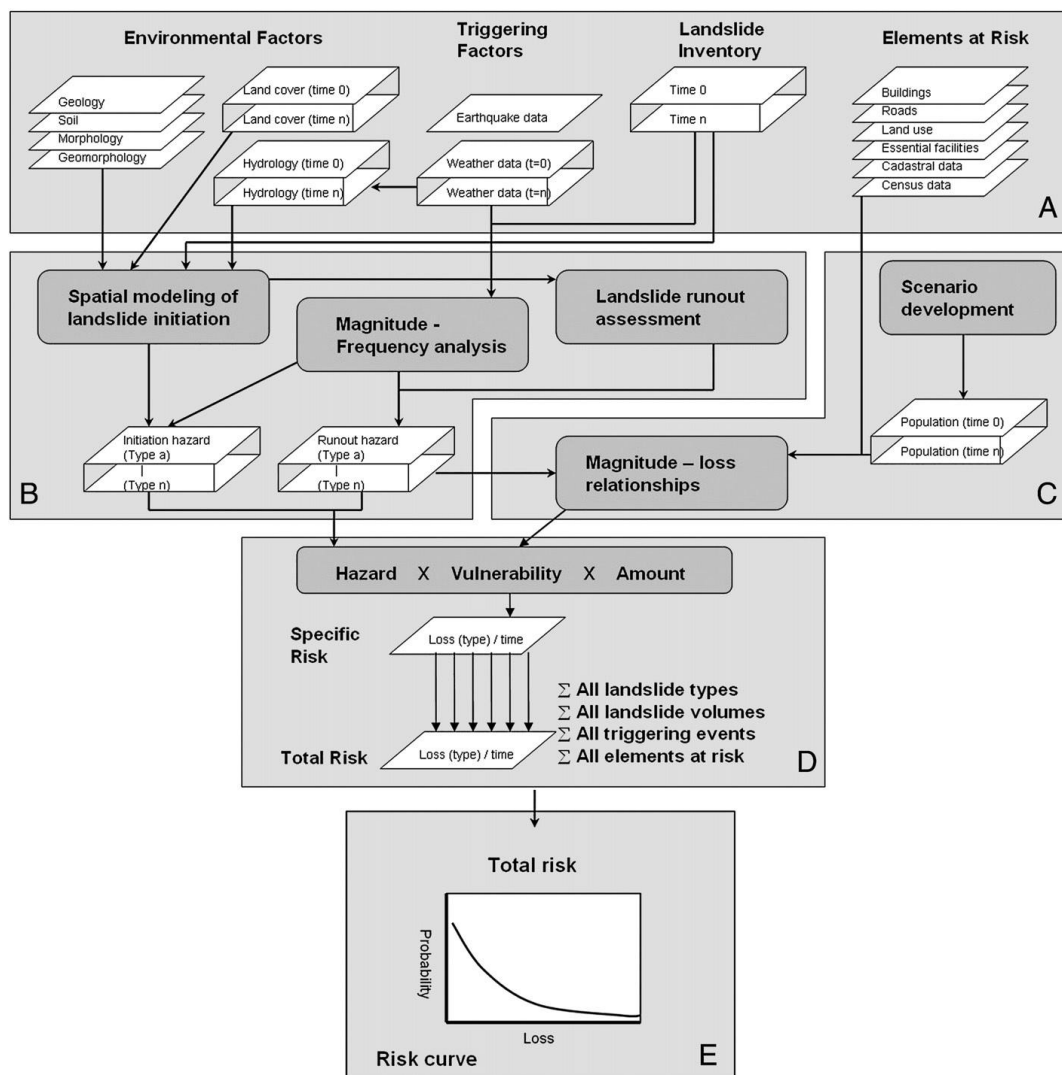


Figura 1.2-4 Schematica rappresentazione dei principali dati richiesti e della procedura per la valutazione del rischio da frana (van Westen et al., 2008)

Numerosi sono gli approcci utilizzati e rintracciabili nella bibliografia scientifica per la realizzazione di mappe di suscettibilità da frana. Come essenzialmente riportato in Figura 1.2-5, questi possono essere divisi in due categorie principali, gli approcci qualitativi e quelli quantitativi (Aleotti e Chowdhury, 1999). Gli approcci di tipo qualitativo si basano esclusivamente sul giudizio dell'esperto, e i dati di ingresso al sistema sono generalmente derivati da indagini di campo eventualmente supportate da analisi foto-interpretative. Gli approcci di tipo quantitativo si basano su analisi statistiche o deterministiche. Il limite tra i metodi non è rigido ma le metodologie, vista la complessità delle variabili presenti nel sistema, in molti casi sono spesso caratterizzate da un elevato grado di ibridizzazione, andando ad interagire tra di loro al fine di migliorare le performance dei modelli.

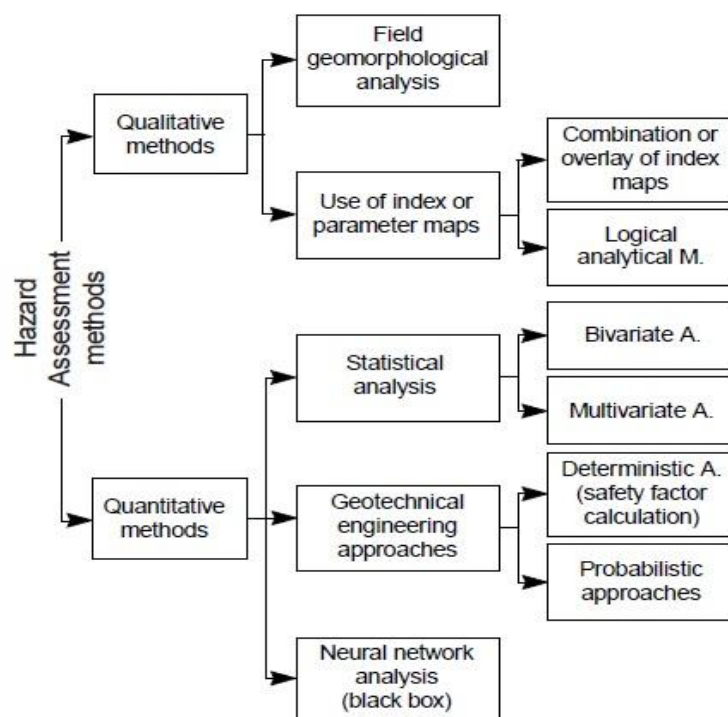


Figura 1.2-5 Metodi per la valutazione della suscettibilità e della pericolosità di fenomeni franosi. Aleotti e Chowdhury (1999).

- Modelli qualitativi

I metodi qualitativi si basano sull'osservazione geomorfologica e sull'interpretazione delle evidenze delle frane passate che possono indicare altre aree del paesaggio con simili caratteristiche a quelle interessate da frane in passato (Chaplow, 1983; Leroi, 1996; Nicholson, 2004). Ciò può essere fatto attraverso l'interpretazione di foto aeree o altre tecniche di telerilevamento (*remote sensing*) e soprattutto attraverso osservazioni di campo. In genere si utilizzano approcci qualitativi come analisi preliminare o per aree molto localizzate, dove un maggiore dettaglio di investigazione è richiesto, spesso in relazione alla progettazione di infrastrutture.

- Modelli quantitativi

I metodi quantitativi sono generalmente più oggettivi e si basano su modelli statistici e matematici. Si dividono in deterministici e statistici.

I metodi deterministici si basano sullo studio delle leggi fisiche che determinano lo sviluppo dell'instabilità e quindi l'innescò del fenomeno franoso. L'applicazione di questi metodi richiede analisi geotecniche e idrologiche di dettaglio al fine di valutare il fattore di sicurezza per un determinato pendio. Le informazioni richieste da questi metodi sono difficili da reperire per aree ampie e quindi il loro utilizzo è preferibile su aree piccole o alla scala del singolo pendio.

I metodi statistici sono sicuramente quelli più largamente utilizzati negli ultimi decenni per l'analisi di suscettibilità da frana. Questi metodi permettono, sulla base delle relazioni esistenti

tra fenomeni franosi e fattori predisponenti l'instabilità, di attribuire dei pesi che statisticamente riflettono l'influenza che ogni fattore predisponente ha sulla instabilità stessa. Questo garantisce una distribuzione oggettiva e ripetibile del peso delle variabili in modo da creare un minor grado di soggettività rispetto ai metodi qualitativi.

Uno degli aspetti negativi dei metodi statistici nasce dalla necessità di avere una buona qualità dei dati di partenza, sia in termini quantitativi che di distribuzione spaziale, e la bontà del risultato è dunque fortemente dipendente da essa. In letteratura esistono una varietà di tecniche statistiche utili per la creazione di mappe di suscettibilità, tra le quali si elencano: *discriminant analysis* (Carrara 1983; Ardizzone et al., 2002; Guzzetti et al., 2006a); *weight of evidence* (van Westen et al., 1993; Blahut et al., 2010; Regmi et al., 2010; Hussin et al., 2016); *logistic regression* (Carrara et al., 1992; Dai e Lee 2002; Ohlamacher e Davis 2003; Ayalew e Yamagishi 2005; Rossi et al., 2010); *frequency ratio* (Lee e Pradhan 2007; Yilmaz et al., 2009); *artificial neural network* (Pradhan e Lee 2009; Tien Bui et al., 2012, 2016).

- Altri metodi

Oltre ai metodi quantitativi e qualitativi finora brevemente introdotti, esiste un altro gruppo di approcci alla suscettibilità che può essere considerato una via di mezzo tra i due precedenti, ossia i metodi euristici. L'approccio euristico contiene un sostanziale grado di soggettività che consiste nell'attribuire a priori un certo grado di importanza ad ogni variabile geo-ambientale usata. L'analisi di suscettibilità mediante metodo euristico è pertanto controllata dall'esperto responsabile dell'analisi. Di conseguenza, la principale limitazione del metodo consiste proprio nella soggettività con la quale l'esperto realizza l'attribuzione empirica dei pesi delle variabili. Tuttavia questi metodi, se combinati con processi analitici, possono essere un potente strumento in grado di ridurre l'errore nel caso in cui un *dataset* non abbia sufficiente qualità, e inoltre può portare alla creazione di mappe di suscettibilità più attendibili rispetto ai metodi statistici, i quali molte volte creano notevoli generalizzazioni che devono essere in ogni caso accettate nell'analisi (Castellanos Abella e Van Westen, 2008).

All'interno di questo gruppo rientra il metodo proposto da Castellanos Abella e Van Westen (2008) per la creazione di una mappa di rischio da frana a scala nazionale per il territorio di Cuba. Si tratta della *Spatial Multi-Criteria Evaluation* (SMCE) che riprende i concetti generali della *Analytic Hierarchy Process* (AHP) sviluppata da Saaty (1980). La AHP, e dunque la SMCE, vengono tutt'ora largamente utilizzati per analisi di suscettibilità da frana in contesti diversi per processi decisionali (Ceballos-Silva e Lòpez-Blanco 2003; Svoray et al. 2005; Hossain et al. 2007; Gorsevski e Jankowski, 2010).

- Scale di lavoro e unità di mappa

L'analisi di suscettibilità può essere condotta utilizzando diverse scale di lavoro e non può prescindere dalla suddivisione del territorio in unità spaziali che vengono considerate omogenee da un punto di vista geologico-ambientale, e comunemente definite come unità di mappa.

La scelta della scala di lavoro dipende dall'utilizzo previsto del prodotto finale e dalla risoluzione e qualità dei dati (Cascini, 2008; Fell et al., 2008; van Westen et al., 2008). Cascini (2008) nel suo lavoro identifica e presenta quattro scale di lavoro per la valutazione della suscettibilità: piccola, media, grande e di dettaglio.

Così come riportato dall'autore, l'analisi a piccola scala ($1 < 100.000$) può essere usata generalmente su aree più grandi di 10.000 km^2 , al fine di informare organi decisionali e pubblico. Studi di questo tipo, a carattere nazionale o regionale, possono essere molto utili per l'individuazione di porzioni di territorio sulle quali approfondire le indagini. A queste scale le possibili applicazioni sono perlopiù di tipo qualitativo e consentono dunque valutazioni di carattere generale.

La scala media ($1:100.000$ - $1:25.000$) è adatta per l'analisi di un'area compresa tra i 1000 e i 10000 km^2 , per analisi di sviluppo regionale o progetti ingegneristici a larga scala.

Le indagini a grande scala da $1:25.000$ a $1:5.000$ possono interessare aree dai 10 ai 1000 km^2 , e sono idonee per analisi di aree ristrette con l'ausilio di metodologie quantitative utili all'analisi e alla zonazione del territorio ai fini di interventi di pianificazione territoriale, urbanistica, e piani avanzati di grandi strutture ingegneristiche come strade e ferrovie.

Alla scala di dettaglio ($1 < 5.000$) dovrebbero fare riferimento aree comprese tra alcuni ettari e alcune decine di chilometri quadrati. A questa scala è possibile l'applicazione di procedure sofisticate come ad esempio metodi deterministici, e dunque i dati utili per la realizzazione di mappe di suscettibilità devono essere di estremo dettaglio. L'analisi a questa scala permette la realizzazione di mappe di pericolosità locali o specifiche di sito, utili per la fase progettuale di strutture ingegneristiche, strade e ferrovie.

Per ciò che riguarda l'unità di mappa, vari metodi di partizione del terreno sono stati proposti, che rientrano in una delle seguenti sette categorie (Van Den Eeckhaut et al., 2009): (i) le celle della mappa (*grid*), (ii) unità di terreno, (iii) *unique condition units*, (iv) le unità di pendio, (v) unità geo-idrologiche, (vi) le unità topografiche, e (vii) unità politiche o amministrative. La scelta del tipo di mappatura va ad influenzare il modo in cui le incertezze nei dati di input vengono trattate, come viene applicato il modello, e l'affidabilità del risultato finale (Guzzetti et al., 1999); essa dipende a sua volta dalla scala di lavoro e dalla finalità ultima applicativa della mappa ottenuta, ma anche dal tipo di dati a disposizione. In letteratura sono stati analizzati in diversi lavori i principali vantaggi e svantaggi dei diversi tipi di unità spaziali (van Westen et al.,

1993; Guzzetti et al., 1999; Guzzetti et al., 2006b, e relativa bibliografia), a cui si rimanda per un maggiore approfondimento sulla tematica.

2 Area di studio

In questo capitolo viene presentata l'area, oggetto di studio, definendone le caratteristiche geologiche e geomorfologiche. Come descritto nel capitolo precedente, il progetto di ricerca affronta diverse problematiche e presenta diverse analisi, che si concentrano su due scale di lavoro. A tal proposito, dunque, verrà effettuato un inquadramento prima su un'ampia scala, caratterizzando tutta la regione Molise, e successivamente l'attenzione si focalizzerà sul bacino idrografico del Torrente Rivo, sito nella provincia di Campobasso, affluente minore del più esteso bacino del Fiume Trigno.

Geograficamente la regione Molise è situata nel settore centro-meridionale italiano, e confina con le regioni Abruzzo, Lazio, Campania e Puglia. Caratterizzata da un'estensione di circa 4437 kmq, essa rappresenta la più piccola regione d'Italia dopo la Valle d'Aosta. Dal punto di vista fisiografico occupa i settori settentrionali dell'Appennino meridionale e si affaccia sul mare Adriatico con una costa di 35 km (Figura 2-1).

L'idrografia regionale è formata da una complessa rete idrografica, caratterizzato dalla presenza dello spartiacque della dorsale appenninica che crea dei corsi d'acqua defluenti verso gli opposti versanti, tirrenico e adriatico: il primo, tirrenico, è caratterizzato dai fiumi Volturno e Tammaro (affluente del Calore), mentre sul versante adriatico sono presenti i fiumi Sangro, Trigno, Biferno e Fortore, cui si aggiungono i bacini secondari quali i bacini minori e il bacino del Torrente Saccione.



Figura 1.2-1 In figura vengono riportati i principali bacini molisani, i principali corsi d'acqua, le principali città e i nomi delle confinanti regioni. Inoltre in ombreggiato viene identificato il bacino del Rivo, caso di studio di questo progetto di ricerca.

Per quel che riguarda la popolazione, al 31 Dicembre 2015 essa si attesta a 312.000 unità. La sua distribuzione non è omogenea essendo soprattutto concentrata nelle maggiori città, quali Campobasso (capoluogo di regione), Isernia (Provincia), Termoli e Venafro, che comprendono circa un terzo della popolazione (dati ISTAT, 2016).

Economicamente la regione è scarsamente sviluppata rispetto alle altre regioni d'Italia. Il settore primario, che raggruppa le attività che riguardano l'agricoltura, l'allevamento, la pesca, ecc., è quello da cui derivano le maggiori rendite economiche. I maggiori poli industriali sono raggruppati nelle aree adiacenti alle città di Termoli, Campobasso, Bojano e Venafro.

Per quel che riguarda il bacino del Torrente Rivo, in relazione al progetto di ricerca, la scelta è ricaduta su di esso poiché per le sue caratteristiche geologico-ambientali è rappresentativo dei settori collinari centrali della regione Molise. Le caratteristiche geomorfologiche e il notevole impatto dei fenomeni erosivi sul territorio rendono questo bacino ideale come area di studio, in relazione alla tematica di ricerca qui sviluppata.

Il bacino del Rivo si estende per 82 km² e ricade per circa il 60% nei limiti amministrativi del comune di Trivento, mentre il restante 40% è suddiviso nei comuni di Salcito, San Biase, e S. Angelo Limosano. Inoltre, piccole porzioni ricadono nei territori di Bagnoli del Trigno, Pietracupa, Fossalto, Lucito e Civita Campomariano.

Lo stesso bacino rispecchia i caratteri socio-economici della regione molisana, la cui sussistenza economica è legata soprattutto agli introiti derivati dall'artigianato e dall'agricoltura. Nell'area vi è un'età media molto elevata, a causa di una mancanza di ricambio generazionale e della migrazione della popolazione verso i centri abitativi maggiori, con conseguente aumento dell'abbandono delle terre negli ultimi decenni.

2.1 Inquadramento geologico regionale

L'arco appenninico è una catena a pieghe e sovrascorrimenti, risultato della continua convergenza con conseguente collisione continentale avvenuta tra il Miocene ed il Pleistocene inferiore tra la placca europea e quella africana. Il processo di collisione ha determinato la deformazione delle unità tettoniche coinvolte e la migrazione di tutto il sistema Catena-Avanfossa-Avampaese verso i quadranti orientali.

Il limite tra arco settentrionale e quello meridionale è rappresentato da uno scorrimento obliquo che si sviluppa approssimativamente da Nord a Sud e che separa il segmento occidentale (Appennino Settentrionale) da quello orientale (Appennino Meridionale) (Castellarin et al., 1978; Migliorini, 1950; Parotto e Pratlun, 2004, e relativa bibliografia).

La regione Molise ricade nell'area di sutura tra l'arco appenninico settentrionale e quello meridionale, due grandi strutture arcuate che costituiscono la catena appenninica (vedi Figura 2.1-1). Entrambi questi archi sono a loro volta costituiti da archi minori che differiscono per estensione e curvatura. In particolare, l'Appennino centro-meridionale costituisce un'entità alloctona con trend NO-SE che sovrascorre su una successione di avampaese, la quale è in continuità con quelle in affioramento della piattaforma Apula (Mostardini e Merlini, 1986).

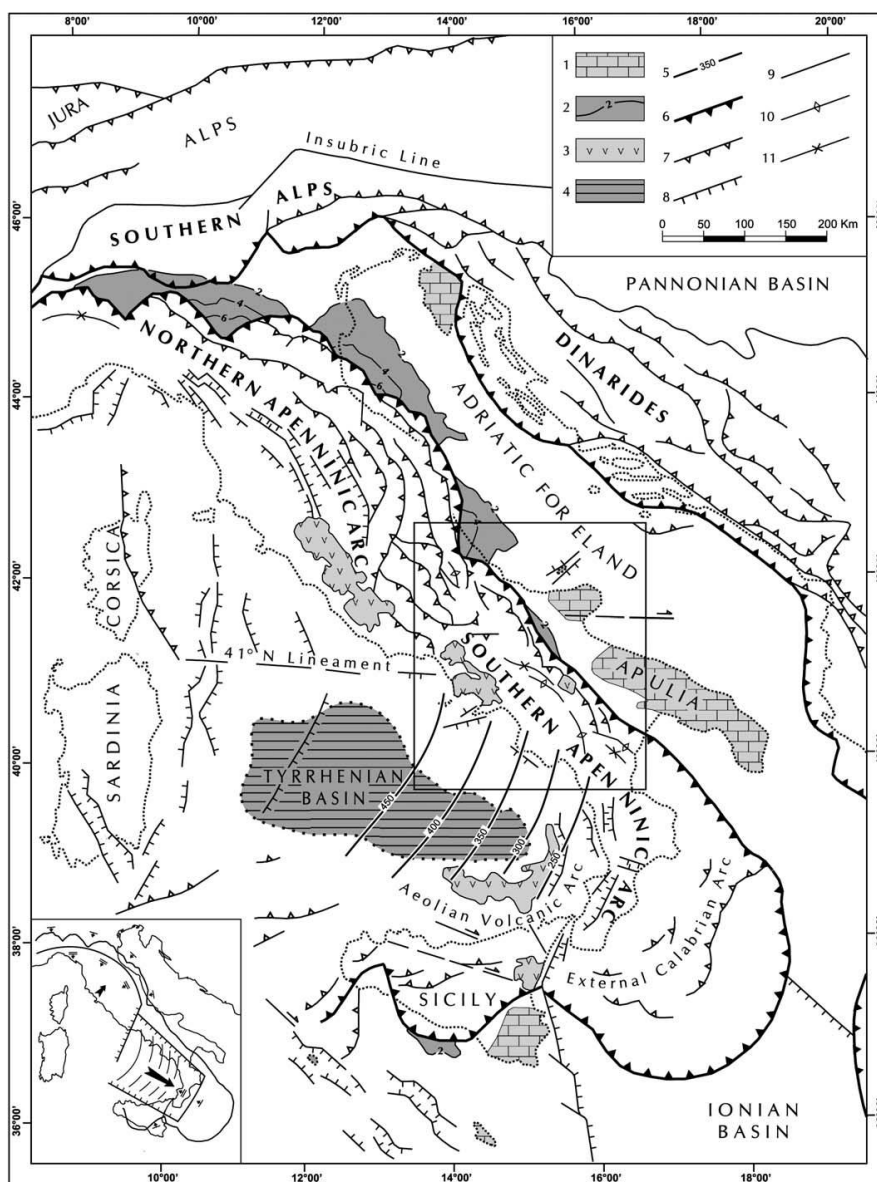


Figura 2.1-1 Schema geologico-strutturale della catena appenninica tratta da Patacca e Scandone (2007), Il riquadro identifica l'arco meridionale.

Nell'arco meridionale come in quello settentrionale si distinguono quattro elementi geologici (Figura 2.1-2, da Patacca e Scandone, 2007), così ripartiti da Est verso Ovest:

- Avampaese Apulo, caratterizzato da evaporiti triassiche, al di sotto delle quali ritroviamo i calcari meso-cenozoici di piattaforma, che stratigraficamente si sovrappongono al basamento cristallino;
- Area di Avanfossa, che nell'Appennino meridionale affiora in continuità dall'Abruzzo alla Sicilia ed è costituita perlopiù da sedimenti clastici marini Plio-Quaternari derivanti dallo smantellamento delle falde appenniniche che vanno a riempire la depressione sviluppatasi sul fronte della catena a causa della subsidenza flessurale della *lower-plate*;
- Area di Catena, caratterizzata da successioni di piattaforma carbonatica e di bacino che costituivano il paleo-margine africano, deformate e coinvolte nella strutturazione dell'edificio orogenetico;
- Area Tirrenica, formatasi a partire dal tardo Tortoniano, circa 8 milioni di anni fa, caratterizzata da crosta oceanica e crosta continentale assottigliata, tipica dei bacini di retro-arco del sistema appenninico.



Figura 2.1-2 Elementi geologici dell'Appennino meridionale (da Patacca e Scandone, 2007).

Per chiarire la complessità del settore centro-meridionale della catena appenninica sono state proposte, a partire dagli anni 60, una serie di ipotesi paleogeografiche. Ogniben (1969) proponeva la presenza di un bacino tirrenico, della piattaforma appenninica, del bacino lagonegrese e della piattaforma apula. Mostardini e Merlini (1986) suggeriscono la presenza di due piattaforme separate dal bacino lagonegrese, di cui quella più esterna interessata da un bacino intra-piattaforma definito come bacino apulo. Essi prevedono quindi la presenza di sei

domini che da Ovest verso Est sono: bacino tirrenico, piattaforma appenninica, bacino lagonegrese-molisano, piattaforma apula interna, bacino apulo, piattaforma apula esterna.

La ricostruzione paleogeografica più recente risale a Patacca e Scandone (2007), i quali ipotizzano un unico bacino lagonegrese-molisano ed un'unica piattaforma carbonatica apula (Figura 2.1-3).

L'attuale strutturazione geometrica della catena centro-meridionale appenninica è dunque il risultato di una serie di eventi deformativi, di carattere compressivo, avvenuti dal Miocene Inferiore al Pliocene Superiore con migrazione di scollamenti e sovrascorrimenti dalle zone interne a quelle esterne della catena (Festa et al., 2006). Più specificatamente le deformazioni nel settore molisano in età Tortoniana-Messiniana vedono il coinvolgimento del prisma di accrezione dell'Unità carbonatica Matese-Frosolone e dell'antistante bacino molisano, come testimoniato dai depositi di avanfossa.

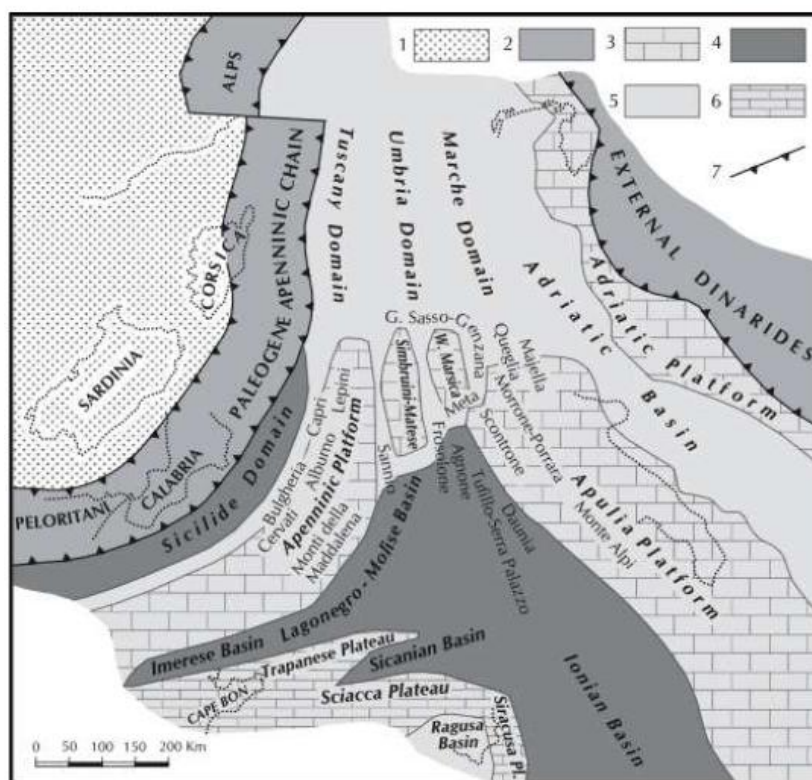


Figura 2.1-3 Ricostruzione paleogeografica secondo Patacca e Scandone (2007). 1) Avampaese Europeo; 2) Catena del Paleogene; 3-6) Avampaese africano assottigliato 4) Bacini su crosta continentale assottigliata o su crosta oceanica; 5) Bacini separati da alti strutturali; 6) Fronti compressivi

Tra il Messiniano inferiore ed il Pliocene superiore, nel settore appenninico molisano si assiste alla messa in posto dell'Unità sannitica che ricopre tutte le unità del prisma di accrezione (Figura 2.1-4). L'intervallo plio-pleistocenico è caratterizzato dallo sviluppo di *wedge-top* sulle falde (Ascione et al., 2011), che identificano ambienti poco profondi. In un intervallo di tempo simile,

nei settori del basso Molise si assiste alla venuta a giorno delle successioni carbonatiche dell'Unità Matese-Frosolone (Amato et al., 2014).

Successivamente, a partire dal Pleistocene inferiore (2,6 Ma) il Tirreno meridionale è interessato da fasi di assottigliamento crostale, che coinvolgono marginalmente i settori interni dell'Appennino meridionale (Casciello et al., 2006). Questo determina la creazione e l'individuazione di ampie depressioni costiere tirreniche e probabilmente l'inizio della formazione dei bacini intramontani che caratterizzano i settori interni ed assiali dell'Appennino meridionale. I fenomeni di raccorciamento e l'arretramento fessurale della placca adriatica cessano durante il Pleistocene medio (0,7 Ma) (Patacca e Scandone, 2001). Come riportato in Amato et al. (2014), a circa 2,7 milioni di anni il completo distacco dello *slab* in subduzione crea un generale sollevamento della catena (Cinque et al., 1993) e un innesco di tettonica estensionale con senso di estensione NE-SO (Hippolyte et al., 1994; Montone et al., 1999).

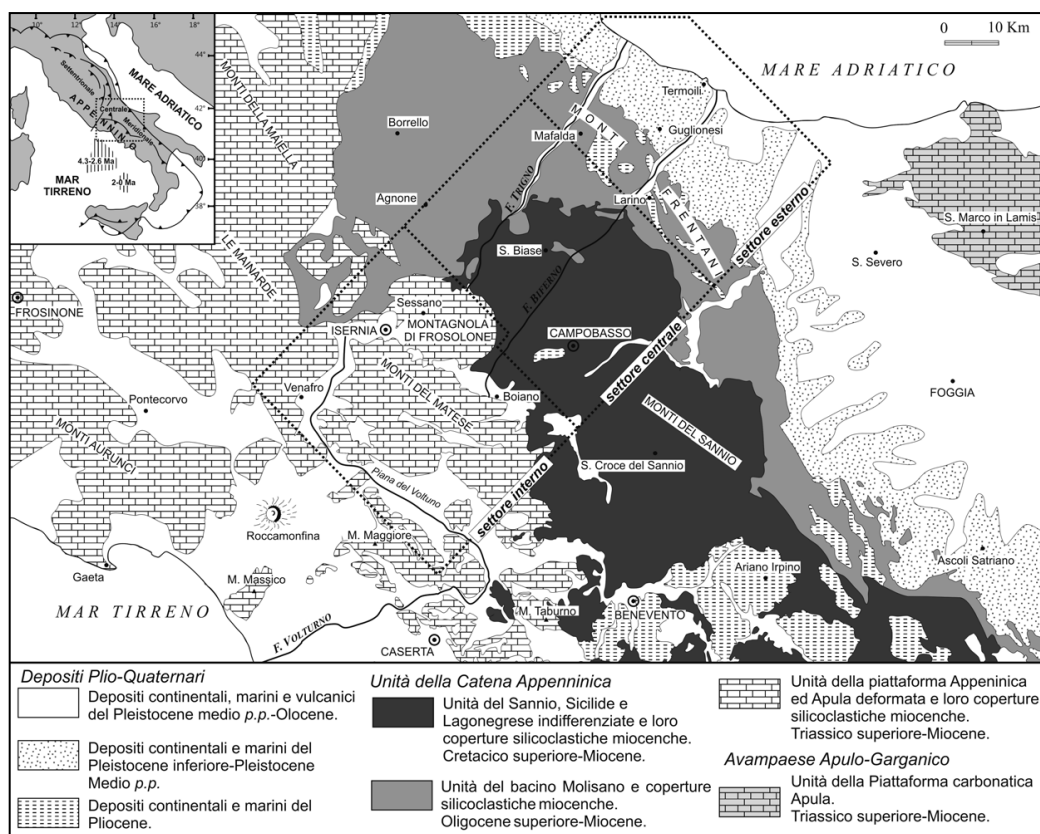


Figura 2.1-4 Schema geologico delle principali unità tettoniche dell'Appennino centro-meridionale e distribuzione delle successioni plio-pleistoceniche (da Amato et al., 2014).

Per una più facile comprensione ed una esaustiva illustrazione della geologia molisana, Vezzani et al. (2004) pubblicano una carta geologica del Molise in scala 1:100.000 corredata da note illustrative ad opera di Festa et al. (2006, e relativa bibliografia), a cui si aggiungono numerose sezioni geologiche rappresentative dell'assetto molisano della catena appenninica. Tale carta e relative note illustrative rappresentano la base geologica su cui sono state fatte le

varie analisi di suscettibilità (vedi capp. 3 e 4). Festa et al. (2006) dividono l'area molisana in differenti unità stratigrafico-strutturali (Figura 2.1-5 A-H).

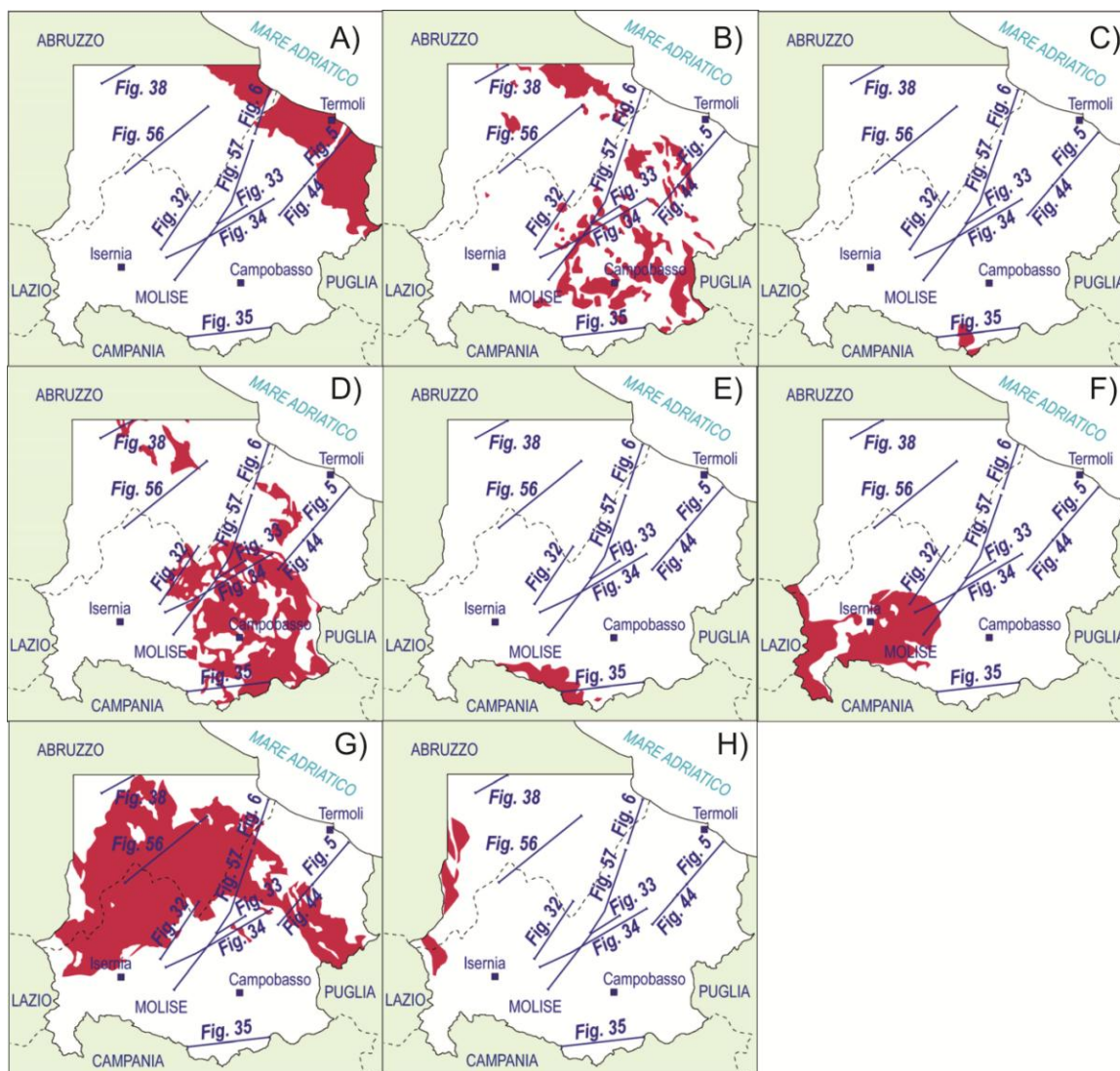


Figura 2.1-5 Unità stratigrafico-strutturali (da Festa et al., 2006). A) Depositi dell'avanfossa Plio-Pleistocenica; B) Bacini di *top-thrust*; C) Unità del Sannio; D) Unità Sicilidi; E) Unità della piattaforma carbonatica Laziale-Abruzzese; F) Unità di transizione della piattaforma carbonatica Laziale-Abruzzese; G) Unità molisane; H) Unità della piattaforma carbonatica esterna.

Le unità stratigrafico-strutturali sono raggruppate in complessi originariamente corrispondenti ai domini paleogeografici, e sono di seguito descritte partendo dalle successioni post-orogenetiche in discordanza sull'edificio tettonico, per poi passare alla descrizione delle unità in posizione geometrica via via più profonde. Le unità stratigrafico-strutturali sono:

- Depositi dell'avanfossa plio-pleistocenica;
- Bacini di *top-thrust*;
- Unità del Sannio;
- Unità Sicilidi;

- Unità della piattaforma carbonatica Laziale-Abruzzese;
- Unità di transizione della piattaforma carbonatica Laziale-Abruzzese;
- Unità molisane;
- Unità della piattaforma carbonatica esterna.

In dettaglio, i depositi dell'avanfossa pleistocenica affioranti nell'ampia fascia litoranea adriatica tra il Fiume Trigno e il T. Saccione affiorano al di sotto di una copertura di depositi fluviali terrazzati di età Pleistocene Superiore-Olocene.

La successione è costituita da argille, sabbie, ghiaie e conglomerati che poggiano direttamente sul substrato carbonatico dell'avanfossa appenninica, e in parte anche lungo i segmenti più esterni del suo fronte, sulle unità alloctone della catena.

Questa successione rappresenta una sequenza di tipo trasgressivo-regressiva che parte dal basso con argille azzurre di piattaforma, per poi passare verso l'alto a depositi più grossolani di sabbie, ghiaie e conglomerati di facies da marine a litorali e fluvio-deltizie (Vezzani, 1975; Lanzafranceschi e Tortorici, 1976).

Per i bacini *top-thrust* Vezzani et al. (2004) differenziano cinque principali successioni che appartengono a bacini dell'avanfossa messiniano-pliocenica. Queste sono:

- la formazione di Atesa, rappresentata da sabbie gialle ben stratificate con intercalazioni argillose che passano verso l'alto e lateralmente ad argille marnoso-azzurre;
- successione di Palombaro, Casalanguida e Larino composta da un intervallo basale di calcareniti organogene giallastre, conglomerati e sabbie talora glauconitiche;
- i conglomerati di Campobasso; calcareniti e conglomerati di Jelsi, rappresentati da conglomerati poligenici a matrice arenacea;
- la successione clastica evaporitica dei Monti Frentani-gessi di Gessopalena;
- le argille del Fortore-sabbie di Valle costituite da un'alternanza di argille biancastre, sabbie e arenarie gialle (argille del Fortore), le quali passano verso il basso in continuità stratigrafica alle sabbie di Valle, poggiando localmente in discordanza sulle argille scagliose sicilidi.

L'unità del Sannio (Figura 2.1-5 C) affiora in Molise solo nella parte estrema meridionale ed è rappresentata dall'Unità di Moschiatturo, una successione costituita da un'alternanza basale di marne rosse, calcari silicei rosso-bruni e calcareniti, passanti verso l'alto a calcareniti con noduli di selce e marne e a calciruditi a rudiste.

Le unità Sicilidi (Figura 2.1-5 D) affiorano in posizione geometrica più elevata nell'edificio strutturale centro-appenninico ed occupano gran parte dei settori centrali della regione Molise. Queste sono costituite in prevalenza dalla formazione delle argille scagliose o argille varicolori; nel dettaglio si tratta di peliti rosse, grigie, verdi e violacee con intercalazioni siltitico-arenacee e

calcareo-silicee. Le argille scagliose poggiano tettonicamente (falda dell'alto Molise) su diversi livelli del Flysch di Agnone delle Formazioni di Tufillo e Faeto e di Sant'Elena.

L'Unità della piattaforma carbonatica Laziale-Abruzzese comprende la successione mesozoica in facies di piattaforma carbonatica che nella carta geologica di Vezzani et al. (2004) affiora solo nella montagna del Matese.

L'unità di transizione della piattaforma carbonatica Laziale-Abruzzese consiste in una successione di transizione piattaforma-bacino, sviluppata in continuità stratigrafica laterale con quella della piattaforma carbonatica del Matese. La successione è composta da dolomie selcifere (Trias superiore- Lias inferiore) passanti verso l'alto a dolomie e calcari dolomitici massivi e localmente nodulari.

Le Unità Molisane costituiscono un sistema di strutture tettoniche est-vergenti, estese dai M. Frentani in Molise ai Monti della Daunia in Puglia. Vengono ascritte ad un dominio paleogeografico di mare profondo, il Bacino molisano, che si interpone tra la piattaforma appenninica e quella apula. Di esse fanno parte le seguenti unità: Unità dei Monti Pizzi-Agnone, e Colle dell'Albaro-Tufillo, di Montenero Valcocchiara, e Monti della Daunia. La prima si compone di due elementi strutturali separati da un sovrascorrimento sub-orizzontale il cui l'elemento strutturale inferiore è caratterizzato da un'alternanza di calcilutiti, radiolariti e marne argillose rosse (Flysch rosso), che passano verso l'alto alle quarzareniti del Flysch Numidico e alle marne e calciluditi della Formazione di Gamberale-Pizzoferrato. L'elemento strutturale superiore è costituito dalla Formazione di Tufillo formata dall'alternanza di calcari marnosi e marne argillose, che si completa verso l'alto passando attraverso poche decine di metri della Formazione di Marne ad Orbulina alle facies torbididiche arenaceo—argillose del Flysch di Agnone.

Le unità dei Monti della Daunia (Miocene inferiore-Oligocene) è l'unità molisana più esterna, ed è costituita da un'alternanza di livelli centimetrici di argille marnose, marne argillose e radiolariti, passanti verso l'alto alla Formazione di Vallone Ferrato (Messiniano-Tortoniano), costituita da marne argillose grigie con intercalazioni di arenarie.

L'Unità della piattaforma carbonatica esterna è presente in Molise nei settori più occidentali è costituita da una successione di facies che costituiscono l'unità di Monte Marrone, Monte Porrara, Pizzalto, Arazzecca, e Delle Rocchette. Queste sono caratterizzate da facies di piattaforma carbonatica a partire dal Lias medio ed evolvono verso facies di margine di scarpata nel Paleocene-Cretaceo superiore.

Come descritto nel capitolo introduttivo, una parte del progetto di ricerca è consistito nella raccolta di dati su fenomeni franosi pluvio-indotti in un'area confinante a Sud con la regione molisana. Quest'area geograficamente è denominata come Sub-Appennino Dauno e rientra nei

confini regionali della Puglia (vedi Figura 2.1-6). Nel contesto geologico regionale pugliese da Est verso Ovest, si distinguono tre domini strutturali sovrapposti: l'avampaese apulo, l'avanfossa appenninica e la catena. L'avampaese è rappresentato dal blocco apulo-garganico e si estende verso Ovest fino ai depositi di avanfossa plio-quadernari. L'avanfossa, sebbene in parte disattivata ed emersa, non è stata ancora del tutto raggiunta dai sovrascorrimenti appenninici a vergenza orientale. I depositi di avanfossa caratterizzano le parti più orientali dell'area del Sub-Appennino Dauno e sono costituiti da una successione regressiva passante da depositi argilloso-siltosi plio-quadernari di ambiente di piattaforma e scarpata a depositi sabbiosi conglomeratici costieri che con passaggi gradualali o in discordanza erosiva, passano poi a depositi continentali (Pieri et al., 2011).

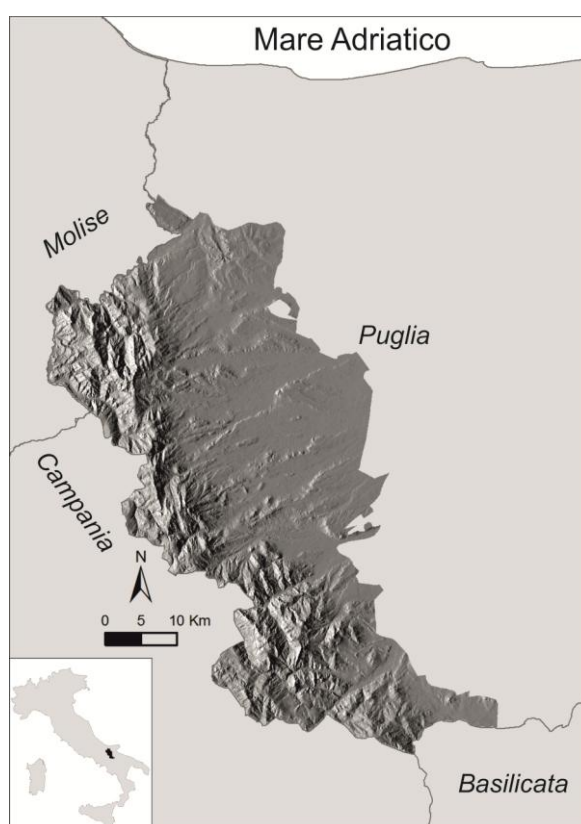


Figura 2.1-6 Localizzazione geografica dell'area del Sub-Appennino Dauno.

Il settore centrale e quello occidentale del Sub-Appennino Dauno sono invece caratterizzati da formazioni flyschiodi con differente grado di tettonizzazione e composizione litologica che mostra in generale un alto contenuto in argilla. In quest'area di catena, in accordo con Dazzaro e Rapisardi (1996), sono state distinte due unità tettoniche, quella del Fortore in posizione più esterna, e l'Unità tettonica della Daunia in posizione più interna. L'Unità del Fortore è costituita dalle formazioni del Flysch Rosso e del Flysch Numidico, ed è sovrainposta dai depositi

miocenici del Flysch di San Bartolomeo e dalle marne argillose della Formazione di Toppo Capuana (Dazzaro et al., 1988).

L'Unità della Daunia è formata da una successione oligocenico-miocenica costituita da Flysch Rosso, Flysch di Faeto e dalle marne argillose di Toppo Capuana (Pieri et al., 2011). Questi depositi sono caratterizzati da successioni di strati calcarei e argillosi (Flysch Rosso), e da successioni torbiditiche marnoso-calcaree (Flysch di Faeto).

Tutte queste unità vengono attribuite al dominio del bacino lagonegrese molisano, ubicato ad oriente della piattaforma sub-appenninica ed a occidente della piattaforma apula (Mostardini e Merlini, 1986). L'Appennino Dauno e la Fossa Bradanica fanno dunque parte del più esteso sistema di *foreland thrust belt*, riconosciuto dal Molise fino al confine calabro-lucano (Mostardini e Merlini, 1986).

2.1.1 Geologia del bacino del Torrente Rivo

Il bacino del Rivo si colloca al margine esterno del versante adriatico della Catena Appenninica e rientra nel foglio geologico n. 162 "Campobasso", in scala 1:100.000 della Carta Geologica d'Italia e nel foglio n. 393 "Trivento" della Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000, a cura di Sgroso e Naso (2012). Il paese di Trivento ricade nei settori superiori e mediano del foglio 393. Nell'area affiorano principalmente terreni marnoso-arenacei ed argillosi, e subordinatamente calcari, calcari con selce e bio-calculutiti. Nelle note illustrative allegate al foglio 393, Sgroso e Naso (2012) organizzano le unità secondo la gerarchia classica, cioè in formazioni e membri. Le formazioni sono raggruppate in quattro unità tettoniche riconosciute come principali: Unità di Tufillo, di Agnone, di Frosolone e del Sannio.

Più specificatamente l'area del Rivo è caratterizzata prevalentemente da due unità tettoniche, cioè dall'Unità del Sannio sovrapposta tettonicamente all'Unità di Tufillo. La prima è caratterizzata dal gruppo delle argille varicolori o variegata di cui fanno parte anche blocchi competenti di dimensioni variabili da qualche centimetro ad alcuni metri, costituiti da calcareniti biancastre, arenarie verdastre, calculutiti bianche, azzurre, rosse e brecce calcaree chiare (ALVb). Le argille varicolori (ALV) passano localmente verso l'alto ai depositi delle marne rosse e verdi di Colledolce (MRD) e sono sottoposte con contatto discordante al Flysch di San Bartolomeo (SBO) del Messiniano-Tortoniano. Il SBO è caratterizzato da un'alternanza di strati di marne argilloso-siltose di colore grigio-azzurro.

In destra idrografica del Torrente Rivo è riconoscibile la sovrapposizione dell'Unità del Sannio, anch'essa caratterizzata dall'elevata presenza di argille varicolori, sull'Unità di Tufillo, entrambe sovrastate tettonicamente dalle successioni più francamente carbonatiche delle marne

rosse e verdi (MRD), che passano in concordanza alla Formazione di Tufillo (Burdigaliano - Messiniano Inferiore).

In successione stratigrafica leggermente discordante sulla Formazione di Tufillo è presente nell'area la Formazione di S. Biase (SYB), costituita da un'alternanza di calcareniti bianche fini e marne chiare in livelli di circa 80 cm, passanti verso l'alto a marne micacee grigio azzurre. Nella carta geologica (consultabile attraverso il link http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/393_TRIVENTO/Foglio.html), sono mappate in maniera estesa su tutta l'area depositi di frana quaternari costituiti da sedimenti prevalentemente argillosi con spessore variabili fino ai decimetri.

2.2 Inquadramento geomorfologico

Da un punto di vista geologico-geomorfologico nella regione è possibile distinguere tre settori con caratteri morfostrutturali ben diversificati. Amato et al. (2014) distinguono un settore interno, uno centrale e uno esterno. Nel settore interno prevalgono le unità di piattaforma carbonatica che formano il Massiccio del Matese e la Montagnola di Frosolone, le quali hanno subito forti sollevamenti nel corso del Pliocene e sono caratterizzati da rilievi che superano anche i duemila metri s.l.m. Il settore centrale, compreso tra la piana di Bojano (Figura 2.1-4) e l'area dei Monti Frentani, è caratterizzata da rilievi collinari che degradano progressivamente verso NE, caratterizzati da successioni marnoso-argilloso-calcaree e silico-clastiche ascrivibili alle Unità bacinali Sannitiche e Molisane. Infine il settore esterno caratterizzante la fascia adriatica è dominato da successioni arenaceo-conglomeratiche di ambiente marino e continentale che costituiscono il ciclo regressivo di età compresa tra il Piacenziano (Pliocene superiore) ed il Gelasiano-Ioniano (Pleistocene) (Bracone et al., 2012). Le successioni appartenenti a questo settore esterno presentano una morfologia molto dolce e regolare, caratterizzate da rilievi collinari terrazzati orientati NNO-SSE, dolcemente immergenti verso il Mare Adriatico e separati dalle pianure alluvionali costiere appartenenti ai fiumi Trigno e Biferno, e ai torrenti Sinarca e Saccione.

Dalla descrizione geologica del contesto molisano, si evince una particolare fragilità nei riguardi dei processi di degrado dei versanti, confermata facilmente dall'analisi geomorfologica e dalla frequenza e distribuzione dei vari tipi di fenomeni franosi (AA.VV., 2001; Aucelli et al., 2000, 2002a, 2003, 2004a, 2004b; Roskopf e Aucelli 2007). L'Appennino molisano, impostato su un settore della Catena Appenninica di recente corrugamento e sollevamento, è infatti caratterizzato da una forte energia del rilievo locale, con valli profonde incise e con fondovalle

stretti e caratterizzati da alvei fortemente confinati. Nei principali contesti di valle, l'interazione tra fenomeni gravitativi e fluviali e/o dovuti all'azione delle acque lungo i pendii, è molto marcata, il che fa sì che l'evoluzione dei fianchi vallivi sia in generale molto rapida (Aucelli, 1999; Aucelli e Rosskopf, 2000; Aucelli et al., 2001; Festa et al., 2006).

Dove gli elementi del paesaggio sono costituiti da versanti acclivi impostati su litologie aventi buone caratteristiche meccaniche, l'evoluzione geomorfologica avviene in modo regolare e lento, così da permettere il raggiungimento di un equilibrio tra i processi di alterazione e di pedogenesi con quelli di erosione, trasporto e accumulo. Dove invece i terreni sono costituiti da litologie caratterizzate da scarsa coesione, con bassa resistenza agli sforzi di taglio e con comportamento plastico, l'evoluzione dei fenomeni di versante verso condizioni di maggiore stabilità avviene prevalentemente attraverso fenomeni franosi sia lenti che rapidi, che di norma si distribuiscono in maniera non continua sia nel tempo che nello spazio. La frequenza e la distribuzione spaziale delle varie tipologie di frana risultano pertanto strettamente collegate all'assetto geologico e strutturale dei terreni, e allo stadio evolutivo dei versanti.

In particolare le frane appaiono associate da un lato alle caratteristiche intrinseche dei terreni (assetto geologico-strutturale, idro-geologico, litologico, etc.) e dall'altro alla morfologia dei versanti, alle pendenze e all'uso del suolo (Lanzafame e Tortorici, 1976; Corbi, 1996; Aucelli et al., 2002a, 2002b, 2004a).

I settori montuosi più alti posti a Sud-Ovest della regione, così come le aree caratterizzate da basse pendenze con ridotta energia di rilievo locale, come ad esempio le conche intramontane e l'area costiera, sono poco interessate da fenomeni di dissesto idrogeologico. Gran parte del territorio molisano è, invece, dominato da aree con un'accentuata morfo-dinamica; ne è testimonianza l'area centrale della regione che risulta essere caratterizzata dai sistemi fluviali adriatici del Trigno e del Biferno e Fortore, dove è evidente come il differente assetto geologico-strutturale influisca in maniera significativa sui fenomeni franosi e sull'instabilità ad essa associata. Difatti le aree centrali sono dominate da litologie calcareo-marnose, arenacee e argillose e sono caratterizzate da permeabilità basse e molto basse, con pendenze prevalenti comprese tra i 15° e i 35°. Tali condizioni sono predisponenti per una serie di fenomeni franosi sia lenti che rapidi, che sono in stretta interazione con i processi di accelerazione idrica concentrata e lineare (*rill erosion*, *gully erosion* e calanchi).

In particolare, analizzando la valle del Fiume Trigno, caratterizzata da una maggiore presenza di terreni litoidi rispetto alla confinante valle del Biferno, si registra in maniera più netta l'alternanza tra fasi di attivazione o di riattivazione e fasi di inattività delle frane presenti. Lungo le scarpate fluviali si riscontrano numerose frane, che le modellano attraverso fenomeni di *slope replacement* che contribuiscono alla riduzione delle pendenze locali e anche attraverso fenomeni

di arretramento, derivanti dall'interazione con l'erosione dei principali corsi d'acqua (Festa et al., 2006).

La valle del Biferno è impostata su successioni terrigene a prevalente componente argillosa e argillosa-marnosa, e i fenomeni franosi assumono un ruolo primario nella degradazione diffusa e nel modellamento dei versanti. Le frane in quest'area sono caratterizzate da complessi sviluppi di accumulo, con zone di alimentazione molto ampie.

Nelle porzioni mediane delle valli del Trigno e del Biferno, le scarpate fluviali ospitano numerose evidenze di fenomeni di erosione idrica concentrata che portano la rete drenante all'approfondimento e alla creazione nel tempo di singole incisioni (*gully*) o di veri e propri fenomeni franosi (soprattutto colate). Questo contesto porta in molti casi allo sviluppo di complessi bacini franosi (Figura 2.2-1 e Figura 2.2-2), che insieme alla rete drenante provvedono alla maturazione del sistema vallivo in cui sono compresi (Aucelli et al., 2000; Aucelli e Roskopf, 2000). In questi sistemi complessi, in molti casi i cumuli originari subiscono una rielaborazione attraverso successivi fenomeni gravitativi o fenomeni misti fluviali-gravitativi. In altri casi i detriti di frana vengono trasportati fino agli sbocchi delle valli dove vanno a formare conoidi alluvionali fluvio-gravitativi (Aucelli et al., 2000). I versanti nell'area molisana hanno una forte predisposizione ai fenomeni gravitativi, sia di prima attivazione che di riattivazione, correlati a fattori di innesco esterni, quali eventi meteorici eccezionali (Aucelli et al., 2004a, 2004c) o eventi sismici (Casciello et al., 2003, 2004).

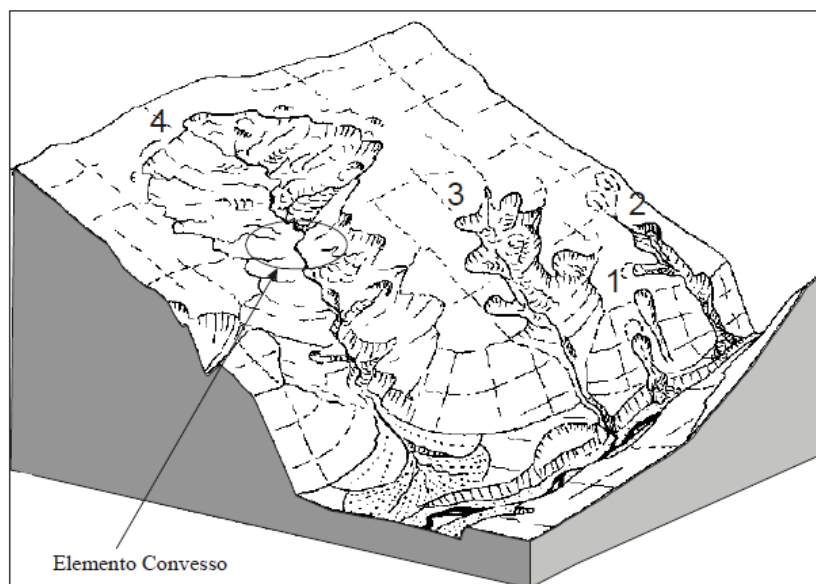


Figura 2.2-1 Schema evolutivo e di maturazione di bacini di frana (Aucelli et al., 2000a)



Figura 2.2-2 Particolare di una zona limitrofa al bacino del Rivo, caratterizzata da aree a diffusa franosità.

Un altro importante fattore esterno che influenza la predisposizione dei versanti alla franosità è la copertura del suolo, inclusi i cambiamenti sia antropici che naturali avvenuti nel tempo (Aucelli, 1999; Aucelli e Roszkopf, 2000). In Aucelli et al. (2004b) si riscontra che la maggior parte delle frane ricade nelle aree caratterizzate da coltivo. Tuttavia considerando che questa classe di copertura del suolo ha un'estensione maggiore rispetto alle altre classi di copertura del suolo, la maggiore frequenza di frane si ha in corrispondenza della classe cespuglieto seguita da foresta e pascolo. In generale gli autori (in accordo con AA.VV. 2001 e Ottaviano et al., 2001) concordano che questo risultato potrebbe essere legato alle seguenti due circostanze: 1) la pratica agricola particolarmente invasiva causa in molti casi l'obliterazione delle evidenze di forme di frana sul territorio con conseguente sottostima del numero di frane osservate rispetto a quelle realmente occorse; 2) l'alto numero di frane ricadenti nelle aree in foresta è probabilmente legato ad un periodo di tempo in cui tali aree erano associate a zone denudate a seguito delle estensive misure di deforestazione praticate dall'inizio del XIX secolo fino alle prime decadi del XX (Di Martino, 1996; Aucelli e Roszkopf, 2000).

L'analisi del database IFFI si conferma un'alta instabilità del territorio molisano, con circa 22500 fenomeni franosi censiti, che coprono circa l'11% della superficie regionale, con le aree in frane che occupano una superficie di poco meno di 500 kmq (Roszkopf e Aucelli, 2007). Analizzando i dati (Figura 2.2-3), i principali tipi di movimento (*sensu* Cruden e Varnes, 1996) sono rappresentati da colate di natura lenta e subordinatamente rapida, secondariamente ritroviamo le frane complesse (circa il 32% delle frane totali), mentre il 18% è associabile a scorrimenti rotazionali e traslazionali. Circa il 6% dell'area è caratterizzata da una franosità definita diffusa, mentre poco più dell'1% comprende crolli e ribaltamenti. Una piccola percentuale, pari allo 0,1%, è invece relativa ai fenomeni di deformazione gravitativa profonda

di versante. La maggior parte delle frane è caratterizzata da uno stato di quiescenza di breve termine, mentre circa il 20% delle frane mostra invece uno stato attivo o riattivato.

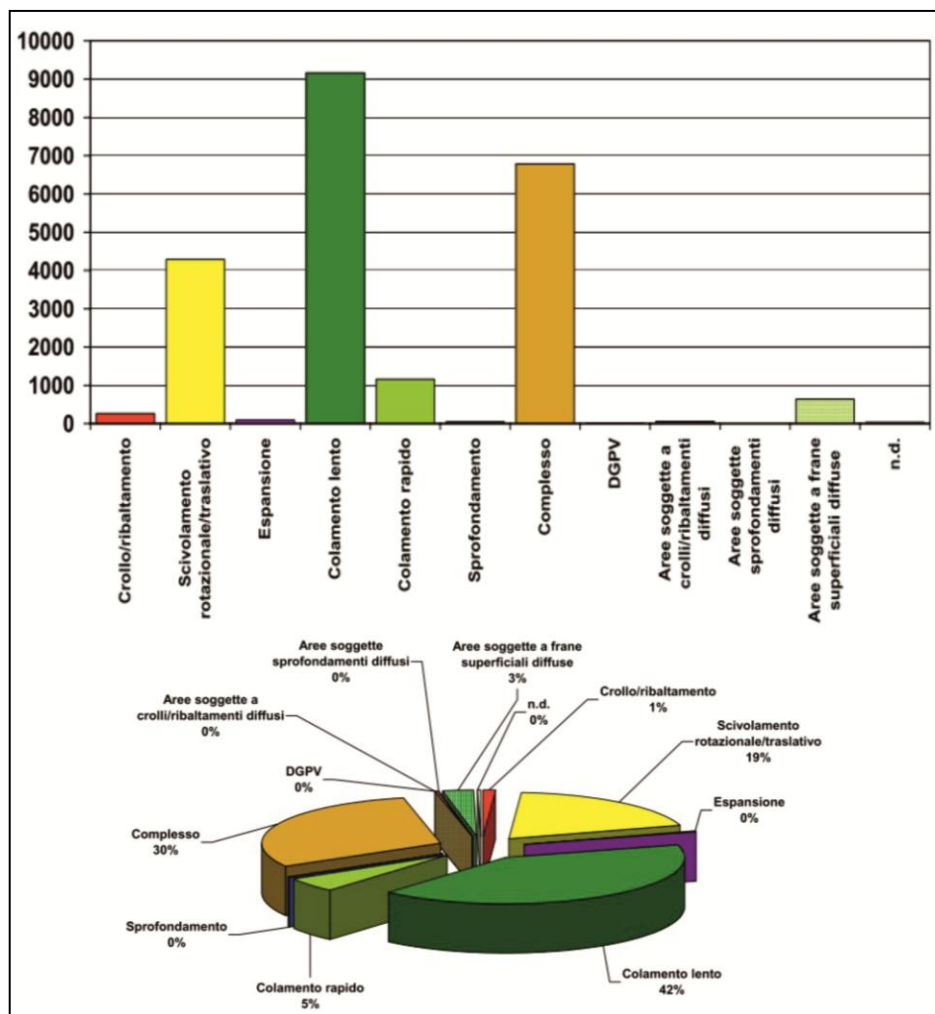


Figura 2.2-3 L'istogramma in alto riporta il numero di frane, distinte per tipologia, mentre il diagramma a torta in basso le riporta in percentuale (da Roskopf e Aucelli, 2007).

Per quanto riguarda invece gli aspetti geomorfologici del Sub-Appennino Dauno, precedentemente citato come area contigua e con caratteri analoghi a gran parte di quella molisana, tale zona ha caratteristiche che rispecchiano i domini geodinamici e le litologie ad essi associati. Si distinguono quindi un settore occidentale di catena caratterizzato da un'orografia montuosa con versanti su cui è visibile un'azione morfo-strutturale derivante in gran parte da deformazioni gravitative, ed un secondo settore caratterizzato dai depositi plio-quadernari di avanfossa, con prevalente evoluzione morfo-erosiva in cui troviamo ampie valli percorse da incisioni fluviali e torrentizie. Gran parte della franosità è concentrata nel settore relativo all'area di catena. Secondo Pellicani et al. (2013) circa il 12% del territorio dauno è caratterizzato da frane innescate da eventi meteorici o terremoti, e i principali movimenti consistono in frane complesse e composite.

In dettaglio, lungo il settore di catena l'affioramento di depositi prevalentemente argillosi, caratterizzati da notevole eterogeneità litologica e con permeabilità estremamente variabile, in assetto geologico-strutturale caotico, rendono tale area fortemente suscettibile allo sviluppo di frane.

I movimenti gravitativi di versante variano (Figura 2.2-4) da fenomeni a profondità limitata, dai classici scivolamenti delle porzioni più superficiali del terreno (*soil slips*), a colate e scorrimenti traslativi o rotazionali, ma comprendono anche ampi bacini di estesi fenomeni di colata, spesso alimentati da aree multi-sorgente (Parise, 2003; Parise et al., 2012), similmente al contesto molisano.

Inoltre, anche nel contesto del Sub-Appennino Dauno l'analisi del paesaggio evidenzia un forte modellamento dei versanti mediante evoluzione di movimenti gravitativi di età ed attività variabile, e con morfologie a differente grado di freschezza. Le riattivazioni dei fenomeni franosi sono prevalentemente connesse ad eventi pluviometrici, con un subordinato ruolo svolto dai terremoti, mentre significativo appare l'effetto derivante da azioni antropiche, con particolare riferimento a variazioni nell'uso del suolo e ad attività agricole su pendii a pendenza medio-alta (Parise e Wasowski, 2000; Lamanna et al., 2009). I fenomeni franosi anche in questo settore creano notevoli problemi ai centri abitati e alle relative vie di comunicazione, che occupano le zone di cresta o si sviluppano a mezza altezza dei pendii (Zezza et al., 1994; Crescenzi et al., 1996).



Figura 2.2-4 Tipici fenomeni franosi nel Sub-Appennino Dauno (foto M. Parise): a sinistra, sviluppo di fenomeni erosivi e soil slips che coinvolgono i primi 1-2 metri del suolo; a destra, grande fenomeno di colata con area di alimentazione multi-sorgente.

2.2.1 Geomorfologia del bacino del Torrente Rivo

Il Rivo è un affluente di destra del Fiume Trigno. Il suo bacino è allungato in direzione N-S e si sviluppa tra la quota minima di 227 m s.l.m. nell'area di confluenza con il Trigno, alla quota massima di Montelungo, pari a 978 m s.l.m.

Il bacino può essere distinto morfologicamente dalla testata alla foce (De Angelis et al., 2008) in tre aree: un settore meridionale, con marcata asimmetria della valle, caratterizzata da un evidente maggiore sviluppo del fianco idrografico destro associato ad un'acclività media in cui i torrenti minori presentano un pattern tipicamente dendritico; un settore centrale in cui i due fianchi vallivi hanno uno sviluppo omogeneo e il corso del torrente è fortemente influenzato dal controllo strutturale delle rocce affioranti; infine un settore settentrionale in cui è visibile una forte asimmetria valliva, con notevole sviluppo del fianco destro a media o bassa acclività, mentre il fianco idrografico sinistro è caratterizzato da alte pendenze medie. All'interno della valle si distinguono inoltre degli grandi ammassi litoidi caratterizzati da pareti a strapiombo in formazione carbonatica fratturata e fagliata, la cui esumazione è legata alla differente erodibilità tra gli stessi e i litotipi al contorno.

A grande scala si distinguono dunque ampi settori di versante ad elevata maturità morfologica caratterizzati da superfici e pendenze mediamente basse. All'interno del bacino risulta essere molto intensa l'interazione tra dinamiche di alveo e di versante che in alcuni casi genera valli dal profilo a V generalmente molto strette. Come descritto in Aucelli et al. (2006), quando queste scarpate si impostano su terreni a prevalente componente argillosa le stesse appaiono diffusamente modellate da frane e incise da profondi solchi di ruscellamento concentrato (*gullies*), nonché talora interessate da fenomeni di erosione calanchiva.

Lo scenario dei fenomeni franosi che caratterizza il bacino del Rivo è molto simile a quello descritto per la regione molisana. All'interno del bacino sono stati censiti dal progetto IFFI 1481 fenomeni franosi (Figura 2.2-6) la maggior parte dei quali sono classificati come colamenti lenti e fenomeni complessi (vedi Figura 2.2-5). Questi ultimi rappresentano il risultato di varie combinazioni di movimento (ad es. scorrimenti rotazionali che nella parte distale evolvono in colamenti), che possono occorrere in sequenza (frane complesse) o simultaneamente in differenti settori del materiale dislocato (frane composite) (Aucelli et al., 2010). Gran parte dei fenomeni franosi è definibile come quiescente, a carattere molto intermittente, cioè con lunghi periodi di inattività alternati a fasi di improvvisa riattivazione.

Per quanto riguarda gli accumuli di frana, molto spesso essi derivano dalla fusione tra depositi di frana adiacenti o a contatto. Le colate sono molto diffuse a causa dell'abbondante componente argillosa che caratterizza i terreni affioranti, e in generale la loro area di alimentazione è rappresentata non solo dalle aree sommitali, ma anche da zone laterali adiacenti

al corpo. Le scarpate principali e secondarie, a causa della scarsa resistenza all'erosione dei terreni coinvolti, vengono cancellate velocemente. Anche gli scorrimenti rotazionali e traslazionali risultano essere molto diffusi nell'area e, al pari delle colate, subiscono un rapido rimodellamento, il che comporta una difficile interpretazione nella differenziazione nelle due tipologie di frana (Festa et al., 2006).



Figura 2.2-5 Esempi di fenomeni franosi nel bacino del T. Rivo: a sinistra tipici fenomeni di colata che coinvolgono i primi metri di suolo; in alto a destra ampio fenomeno di colata caratterizzato da più aree di alimentazione; in basso a destra fenomeni franosi superficiali diffusi.

La maggior parte delle frane censite non supera i 4 m di spessore e si distribuisce lungo le incisioni torrentizie a causa dello scalzamento ai piedi del versante. Secondariamente questi tendono ad avere un'evoluzione regressiva, con stile complesso e multiplo, ampliandosi finché sono attivi i processi di rimozione al piede dei versanti. In molti casi i depositi di frane antiche appaiono profondamente incise. Ciò è dovuto al fatto che grandi volumi di detriti trasportati a valle dalle frane ostruiscono temporaneamente il corso d'acqua, creando bacini a monte dell'ostruzione con contemporanea crescita di un prisma sedimentario che successivamente viene reinciso. In altri casi la dinamica di sbarramento del corso d'acqua da parte di cumuli di frana porta alla sua migrazione laterale. Questa migrazione comporta una destabilizzazione del versante opposto verso cui il corso d'acqua viene spinto, dovuta allo scalzamento alla sua base.

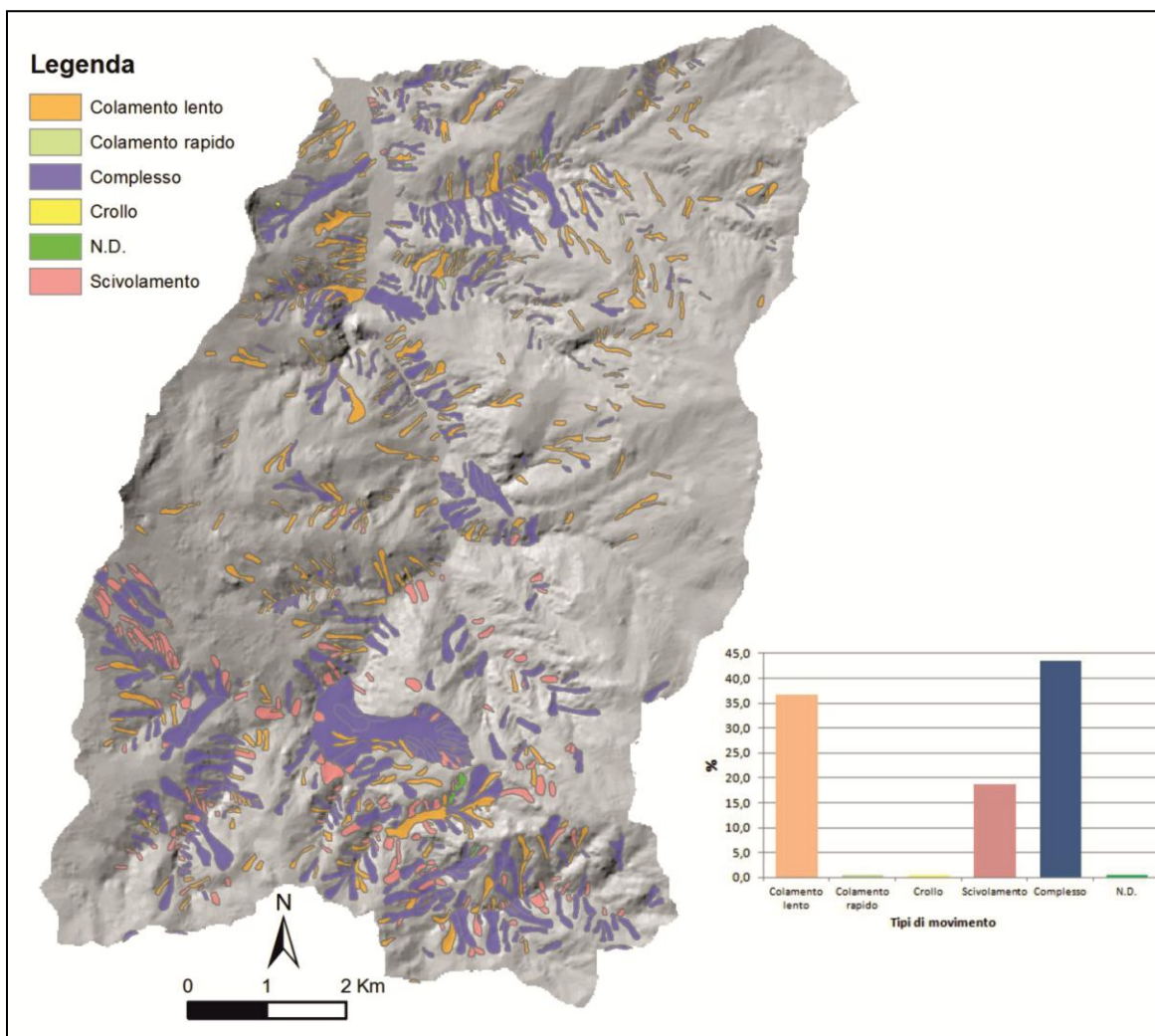


Figura 2.2-6 Distribuzione dei tipi di frana nel bacino del Rivo (fonte IFFI 2007)

2.3 Inquadramento climatico

A grande scala negli ultimi duecento anni nel Bacino del Mediterraneo, il cambiamento climatico è relazionato al declino e alla fine della piccola età glaciale, con conseguente periodo di riscaldamento. In Brunetti et al. (2004) si evince come le precipitazioni annue e il relativo numero di giorni piovosi mostrino un significativo trend negativo su tutta l'Italia per il periodo compreso tra il 1880 e il 2002. Nell'Italia meridionale, condizioni più umide fino al 1930 (Brunetti et al., 2004; Cotecchia et al., 2004; Polemio e Casarano, 2004, 2008; Diodato, 2007), hanno favorito la deposizione di conoidi alluvionali, la progradazione di delta e linee di costa (Aucelli e Roskopf, 2000; Roskopf e Scorpio, 2013), nonché le dinamiche di versante, soprattutto i processi gravitativi. Dal 1930 in poi, il clima diventa progressivamente meno piovoso e più asciutto. Un decremento di precipitazione annua giornaliera, e un intensificarsi del numero di giorni piovosi, si registrano tra il 1970 e il 1990, con un aumento estremo delle

condizioni di siccità specialmente durante i mesi invernali (Brunetti et al., 2001, 2002, 2004, 2012; Izzo et al., 2004; Piccarreta 2004, 2012, 2013; Polemio e Casarano, 2004, 2008; Caloiero et al., 2011). In dettaglio, Piccarreta et al. (2012) dimostrano un trend negativo per le massime cumulate di precipitazioni giornaliere di tre giorni e di cinque giorni, il che viene associato ad un numero minore anche negli eventi estremi. Dal 2000 al 2010 si registra in Italia un'inversione del trend, caratterizzato dunque da un leggero aumento delle precipitazioni annue e una minore lunghezza dei periodi di pioggia (Federico et al., 2010; Piccarreta et al., 2012; Scorpio et al., 2015).

Per quel che riguarda la regione Molise, in merito al clima buone informazioni sono state rese disponibili negli anni da vari autori (Izzo et al., 2004; Aucelli et al., 2007). Ad esempio, sono stati analizzati i dati pluviometrici provenienti dall'ex Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN), che garantiscono un'ampia distribuzione territoriale e una buona copertura temporale. L'analisi (Aucelli et al., 2007) è stata condotta su 85 stazioni pluviometriche e 41 termometriche, la cui distribuzione è riportata in Figura 2.3-1.

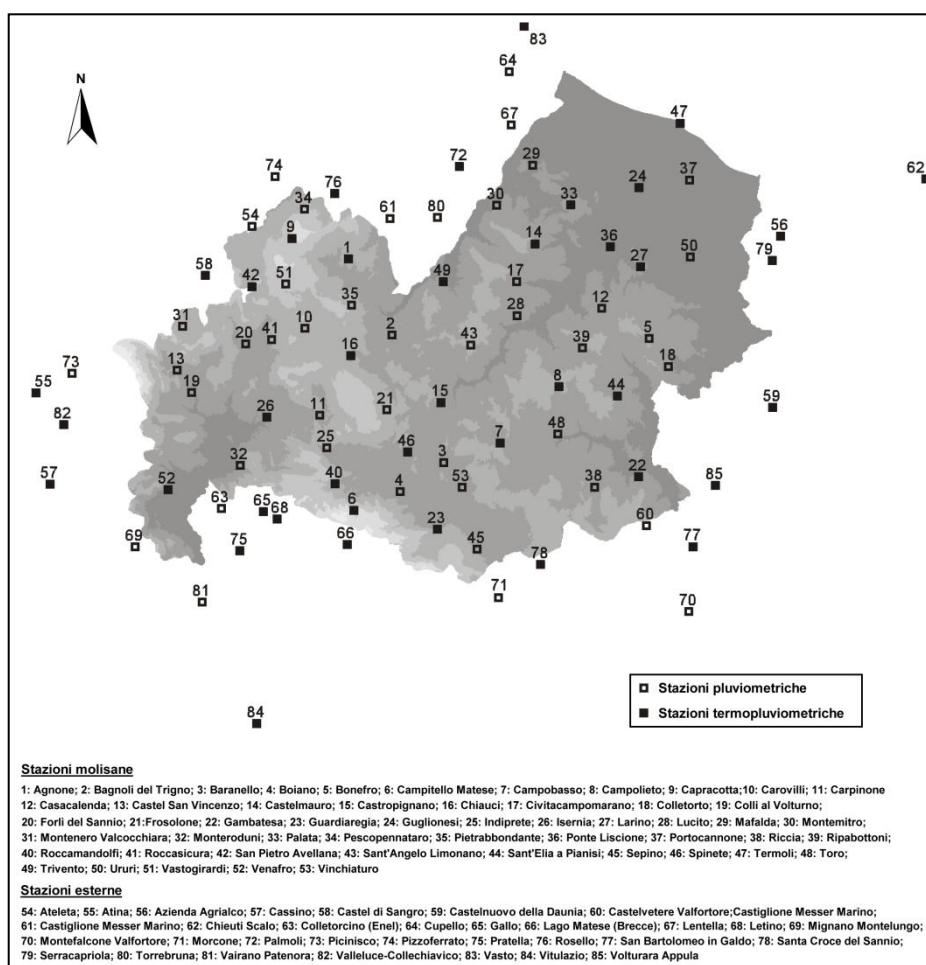


Figura 2.3-1 Distribuzione delle stazioni pluviometriche e termo-pluviometriche considerate nello studio proposto da Aucelli et al. (2007).

La distribuzione delle precipitazioni nella regione Molise costituisce un fattore piuttosto sensibile all'eterogeneità territoriale. Gli autori difatti non evidenziano alcuna legge lineare data dall'aumento di quota con l'aumento di volume di precipitazione e corrispondente diminuzione di temperatura. Solo alcune stazioni ricadenti tra il Bacino del Biferno e quello del Fortore dimostrano un andamento pressoché lineare tra variazione altimetrica e precipitazione. La non linearità sembra essere legata a molteplici fattori, quali l'esposizione delle correnti, la vicinanza dei Monti del Matese, la distanza dalla costa, etc. Proprio il Massiccio del Matese difatti, allungato in direzione NO-SE determina l'intercettazione delle correnti umide provenienti da Est. Ciò fa sì che si abbiano valori di precipitazione elevati anche in aree poste a quote non elevate, e minori di 700 m (ad esempio, Boiano, Guardiaregia e Roccamandolfi).

Più in generale, valori minimi di precipitazione si riscontrano in tutta l'area che comprende la fascia costiera e la zona basso-collinare a ridosso, spingendosi verso l'interno degli assi vallivi dei principali fiumi quali Trigno, Biferno e Fortore (Figura 2.3-2). Nella zona centrale a ridosso della zona collinare, comprendente il settore tra Chiauci e Bagnoli del Trigno, Maranello, Vinchiaturò, e le zone di Campobasso e Riccia, si ha un progressivo incremento della piovosità con un gradiente piuttosto ridotto che si sviluppa fino all'area centrale montuoso-collinare.

Aucelli et al. (2007) mettono in evidenza inoltre due anomalie con isole a maggiore piovosità, rispettivamente poste in destra e sinistra idrografica del Biferno, nell'area di Castelmauro, Casacalenda e Bonefra. Queste anomalie, secondo gli autori, sono giustificate dall'aumento di quota che si ha in questa zona rispetto alle circostanti aree basso-collinari. Diverso è il campo di pioggia che caratterizza l'area occidentale del Matese, settore in cui si ha una media più elevata di piovosità, e il campo di pioggia riproduce esattamente la struttura del massiccio con correlazione lineare tra la precipitazione e l'aumento altimetrico. Nell'area della valle del Volturno e in quella tra Venafro e Isernia si osserva invece una distribuzione omogenea della precipitazione, che si attesta intorno ai 1300 mm, non particolarmente vincolata alla quota altimetrica (Figura 2.3-2).

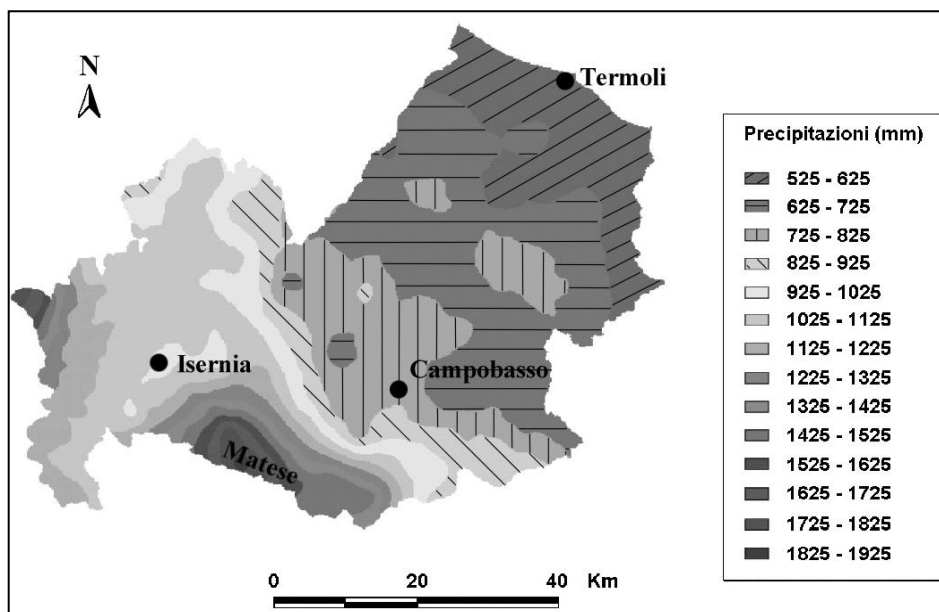


Figura 2.3-2 Distribuzione delle precipitazioni in Molise (da Aucelli et al., 2007).

La distribuzione delle temperature (Figura 2.3-3) evidenzia un andamento molto più regolare, molto vicina alla linearità e, rispondente alla distribuzione delle morfo-strutture principali, con valori medi annui compresi tra i 16° della stazione di Termoli e i 7° in corrispondenza delle maggiori cime montuose.

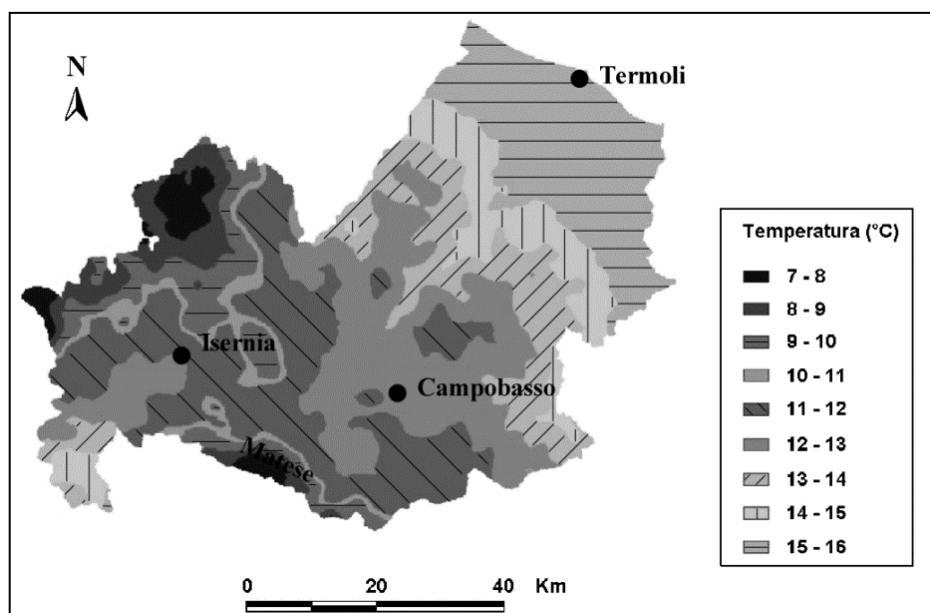


Figura 2.3-3 Distribuzione delle temperature in Molise (Aucelli et al., 2007).

Dall'analisi delle temperature medie annue si evince che, procedendo dalla costa verso l'interno, le stesse diminuiscono, progressivamente ed aumentano nuovamente solo nei settori sud-occidentali. Difatti a partire dalla piana di Isernia si registra un incremento progressivo delle

temperature con i massimi valori medi raggiunti nei territori al confine con la Campania, area influenzata dalle correnti tirreniche risalenti lungo la valle del Volturno.

Per la classificazione climatica (Figura 2.3-4), Aucelli et al. (2007) utilizzano i criteri proposti da Köppen (1936) e in parte modificati da Pinna (1970). In generale per il Molise sono state riconosciute due sotto-categorie dei climi temperato-caldi (C). La prima viene definita come clima con stagione asciutta ricadente nel periodo estivo (Cs) ed è confinata nell'area costiera meridionale, al confine con l'area pugliese dove questo clima è tipico. Il resto del territorio molisano rientra invece nella sotto-categoria dei climi umidi in cui non si riconosce la presenza di una stagione secca (Cf). Quest'ultima zona climatica è a sua volta suddivisa in due aree riferite alla classe climatica temperato-caldo umido con estate calda (Cfb) e temperato-caldo umido con estate molto calda (Cfa). La prima è distribuita nell'area della provincia di Isernia e nei settori del Matese, mentre la seconda caratterizza il settore centrale della regione, sviluppandosi poi verso l'estremità della costa settentrionale.

Tenendo inoltre conto delle modifiche introdotte da Pinna, sono state differenziate altre due classi climatiche, identificate rispettivamente come clima temperato-sub litoraneo (Tsl) e clima temperato caldo (Tc), che hanno una distribuzione limitata sul territorio (Figura 2.3-4). In conclusione, l'analisi climatica regionale evidenzia una distribuzione spaziale delle precipitazioni e delle temperature che rispecchia largamente quella dei principali elementi orografici, dove si riscontra una maggiore sensibilità delle precipitazioni rispetto all'eterogeneità territoriale.

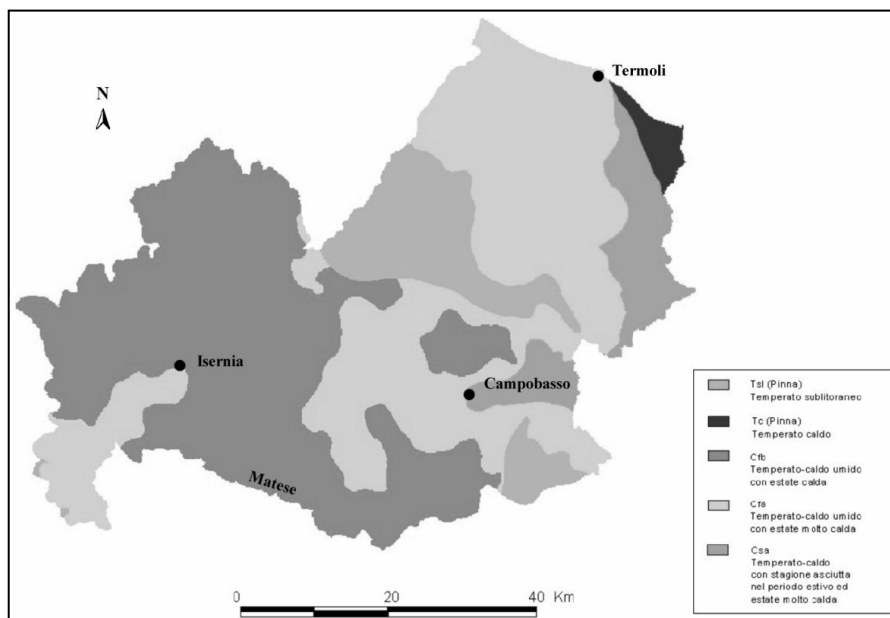


Figura 2.3-4 Classificazione climatica della regione Molise (Aucelli et al., 2007).

Per quel che riguarda il bacino del Rivo, si può attribuire ad esso un clima temperato sub-litoraneo secondo la classificazione di Pinna (1970). Dall'analisi delle precipitazioni, effettuata

considerando i dati della stazione di Trivento, il clima sembra essere caratterizzato da una distribuzione delle precipitazioni bimodale (Figura 2.3-5). Il massimo principale delle precipitazioni avviene durante il periodo autunnale-invernale, mentre il minimo durante il periodo estivo primaverile. Inoltre la gran parte delle precipitazioni sembra essere distribuita nel periodo tra ottobre e gennaio, con picco di temperatura raggiunto a cavallo tra i mesi di luglio e agosto. Le precipitazioni medie annue raggiungono l'apice in prossimità degli spartiacque dove le quote topografiche sono maggiori. I dati della stazione di Trivento mostrano valori medi annui che si attestano intorno a 700 mm anche se, visto il *range* altimetrico di distribuzione, è probabile che questo valore non sia equamente distribuito su tutto il bacino.

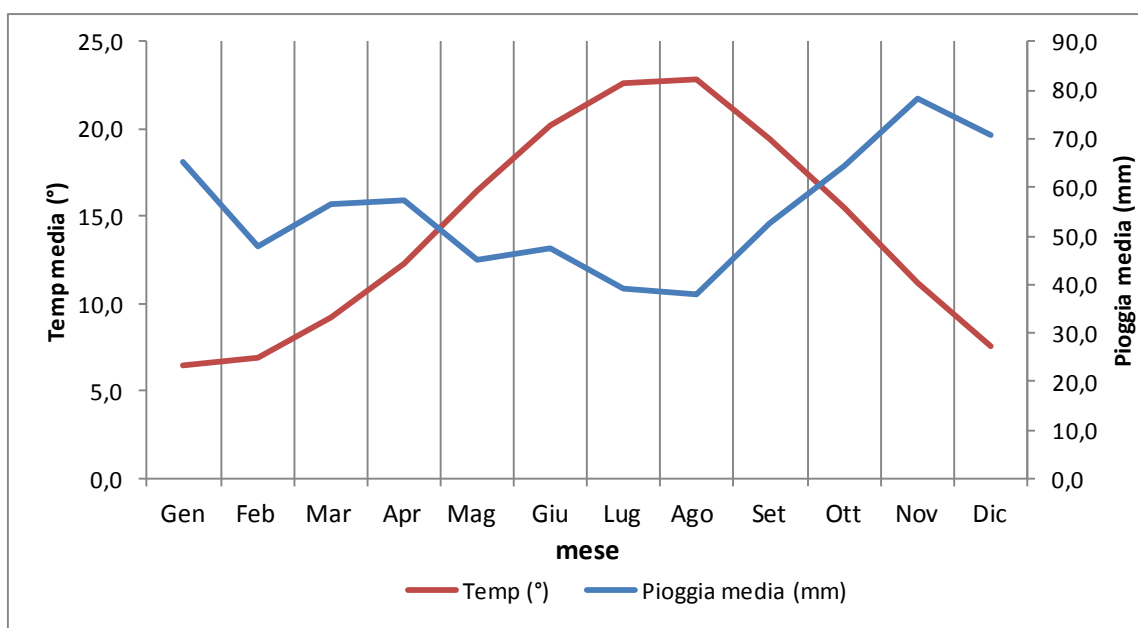


Figura 2.3-5. Diagramma relativo alla stazione pluviometrica di Trivento, riferito al periodo 1951-2011.

3 Dati e metodi

Nel presente capitolo sono descritti i dati e i metodi utilizzati per la realizzazione di mappe di suscettibilità, per la mappa dell'esposizione degli elementi a rischio da frana e l'identificazione della loro possibile correlazione con lo stato di salute demografica a livello regionale. Nella seconda parte del capitolo sono poi descritti i materiali e metodi usati per le analisi, effettuate sul bacino del Rivo. La finalità è quella di valutare l'influenza dei cambiamenti di copertura del suolo sulla distribuzione spaziale e temporale dei fenomeni franosi, attraverso la creazione di diverse mappe inventario dei fenomeni franosi e mappe di suscettibilità da frana multi-temporali per un periodo di circa 60 anni. Dall'analisi delle variazioni passate, sono state inoltre realizzate delle mappe di scenari futuri di copertura del suolo, alle quali è associata la relativa variazione in termini di propensione al dissesto.

Infine, sono introdotti i dati e il metodo utilizzato per una stima speditiva del possibile danno in termini di valore fondiario dei terreni agricoli, in funzione della propensione al dissesto da frana.

3.1 Analisi a scala regionale

Sulla base di quanto descritto nei capitoli precedenti e tenendo conto delle problematiche introdotte, l'analisi della franosità della Regione Molise assume uno stato di priorità peculiare per diversi motivi.

Le ragioni possono essere ricondotte nella conformazione geologica e geomorfologica della regione, già discusse nei precedenti capitoli, ma anche nella azione antropica, che determina mutamenti del paesaggio, ad esempio attraverso cambiamenti delle coperture del suolo, che è uno dei principali fattori di controllo spaziale dei fenomeni franosi.

Le conseguenze dell'alta dinamicità del paesaggio e dell'elevata instabilità si concretizzano in un'elevata esposizione al rischio da frana, sia in termini sociali che di beni materiali. La relazione ISPRA (Istituto per la tutela dell'ambiente e della ricerca) del 2015 ha rilevato come tutti i comuni del Molise siano affetti da almeno una zona con rischio idrogeologico elevato o molto elevato. Inoltre la Regione è stata riconosciuta come avente un numero di popolazione affetta da rischio da frana tra i più alti in Italia (ISPRA, 2015b).

Tali circostanze determinano inevitabili effetti nell'economia e nella vita del territorio, nonché nel suo sviluppo sociale ed economico. Ciononostante, nella letteratura scientifica

ufficiale l'analisi della franosità e delle relative conseguenze in Molise non è stata finora trattata approfonditamente.

Nel tentativo di colmare tale lacuna, in questo capitolo sarà presentata innanzitutto un'analisi della suscettibilità da frana a scala regionale, che rappresenta il primo passo in ogni analisi di pericolosità e di rischio idrogeologico. Saranno inoltre analizzate alcune possibili conseguenze della franosità attraverso una stima del livello di esposizione a rischio frana delle vie di collegamento principali (strade e ferrovie) e delle aree urbanizzate per le 136 municipalità molisane. Sarà infine esplorata la possibile interazione dell'incidenza dei fenomeni franosi sullo stato di malessere della popolazione della regione, attraverso il calcolo di un indice di "stato di malessere demografico" (SMD) ed il confronto di questo con l'analisi di esposizione a rischio da frana.

A questo fine sono qui di seguito riportati i dati input utilizzati nelle analisi e i metodi utilizzati (suscettibilità, esposizione, SMD).

3.1.1 Preparazione dei dati

Al fine di analizzare la probabilità spaziale di accadimento delle frane per la regione Molise e conseguentemente l'esposizione degli elementi a rischio selezionati (centri abitati e vie di comunicazione), nonché gli effetti delle frane sulla popolazione (calcolo dell'indice SMD), sono stati preparati una serie di dati input. Tali dati vengono utilizzati sottoforma di mappe *grid* o vettoriali, o tabelle, e rappresentano le caratteristiche geologiche, geomorfologiche e antropiche del territorio. I dati da includere nelle analisi sono stati selezionati sulla base del metodo applicato e dell'esperienza, tenendo in considerazione anche lavori precedenti in aree geografiche simili, disponibili in letteratura.

Per calibrare gli approcci statistici è stata utilizzata la banca dati cartografica del progetto IFFI (Inventario Fenomeni Franosi in Italia).

La valutazione della suscettibilità è stata effettuata tenendo in considerazione tutti i vari tipi di fenomeni franosi, ad esclusione di crolli e/o ribaltamenti e delle deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV). Nel complesso, le tipologie escluse rappresentano in Molise una percentuale leggermente superiore all'1% (Roskopf e Aucelli 2007). Questa bassa percentuale ha indirizzato la realizzazione del modello di suscettibilità ad escludere tali fenomeni, non solo perché scarsamente rappresentativi ma anche perché la loro natura è notevolmente diversa in termini di condizioni geomorfologiche di accadimento e di distribuzione spaziale.

Le caratteristiche e le modalità di mappatura, nonché i materiali utilizzati per la costruzione del database, sono riportati in maniera esaustiva in Roskopf e Aucelli (2007). La mappa dei

fenomeni franosi estratti dal database IFFI, utilizzata nell'ambito del progetto di ricerca, è riportata in Figura 3.1-1, in cui sono distinte le varie classi di movimento *slides* (scivolamenti), *flows* (colate) e *complexes* (fenomeni complessi).

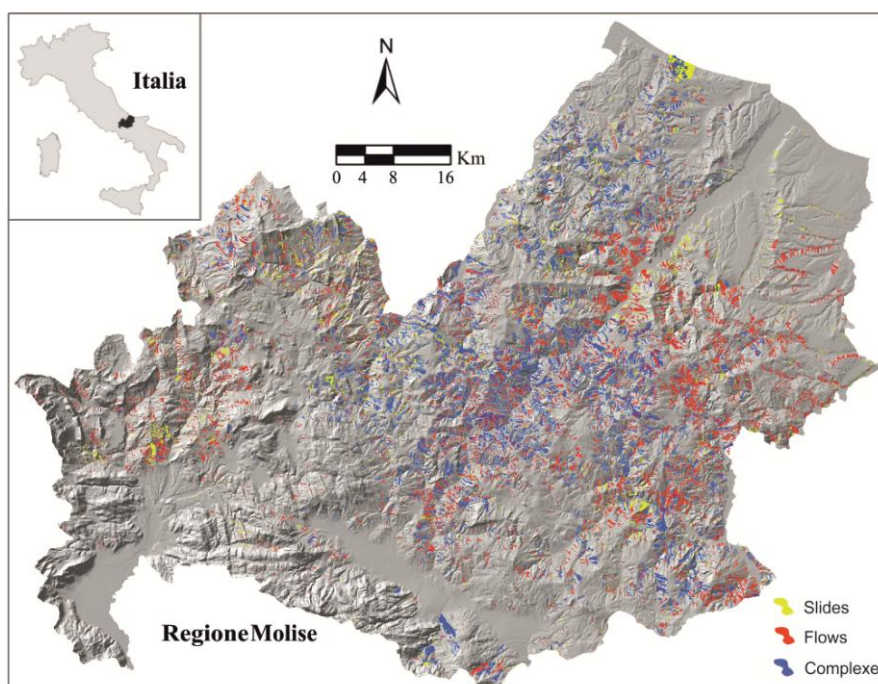


Figura 3.1-1 Regione Molise e tipi di fenomeni franosi estratti dal database IFFI e utilizzati per le analisi statistiche.

Per quanto riguarda la selezione dei fattori predisponenti dei fenomeni franosi, è indispensabile una conoscenza a priori delle cause dell'instabilità (Schuster e Krizec, 1978; Crozier, 1986). Per questo motivo, oltre ad osservazioni dirette di campo, sono stati tenuti in considerazione lavori di letteratura realizzati nell'ambito di valutazioni di dissesto da frana per l'area di studio (Roskopf e Aucelli, 2007; Magliulo et al., 2008; Borgomeo et al., 2014).

La scelta dei fattori predisponenti, inoltre, ha tenuto in considerazione anche la disponibilità dei dati per l'area di analisi. In particolare per lo studio sono stati selezionati i fattori più largamente utilizzati in letteratura per analisi di suscettibilità, e che in questo contesto hanno trovato un'immediata corrispondenza nelle osservazioni di campo.

Per la realizzazione della mappa di suscettibilità sono state innanzitutto preparate delle mappe tematiche che riproducono le caratteristiche morfologiche del terreno, derivate da DEM (*Digital Elevation Model*) con risoluzione 20x20 m, realizzato e messo a disposizione dal Ministero dell'Ambiente (<http://www.sinanet.isprambiente.it/>).

I fattori predisponenti scelti per il territorio molisano sono di seguito riportati:

- Inclinazione del pendio (pendenza)

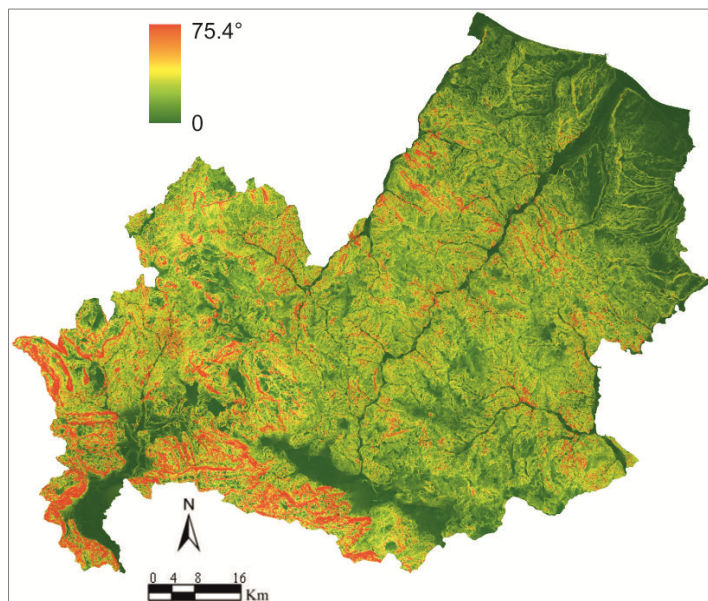


Figura 3.1-2 Inclinazione del pendio

L'inclinazione del pendio (Figura 3.1-2) è uno dei parametri discriminanti più importanti e utilizzati nelle analisi di suscettibilità da frana (Guzzetti et al., 1999; Ohlmacher e Davis, 2003; Mossa et al., 2005; Nefeslioglu et al., 2008; Pourghasemi et al. 2012), in quanto esso esercita un controllo diretto sull'innescio di tutte le tipologie di fenomeni franosi, ed è dunque preso in considerazione nelle analisi qualitative e quantitative di suscettibilità e pericolosità (van Westen et al., 2008).

- Altitudine

L'altitudine rappresenta la quota di ciascun punto del pendio (pixel) ed è un significativo

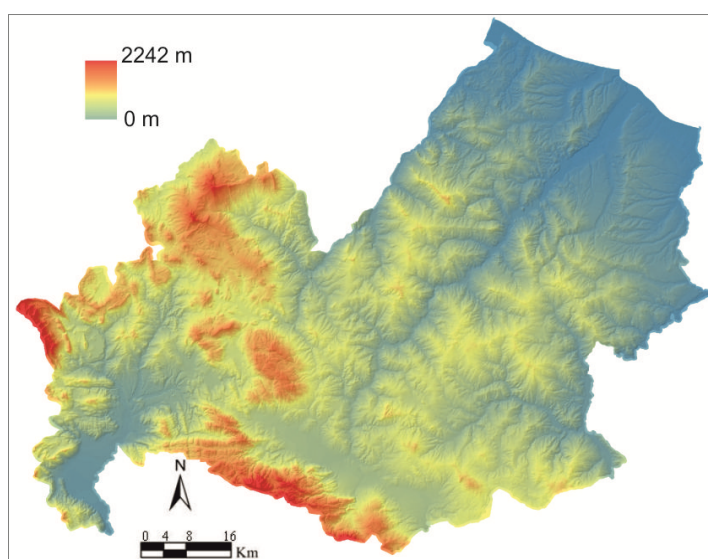


Figura 3.1-3 Altitudine

fattore condizionante, in quanto controllato da diversi processi geologici e geomorfologici (Dai e Lee, 2002; Ayalew et al., 2005).

Al fine di utilizzare l'altitudine come input, è stata preparata una mappa in formato raster riportata in Figura 3.1-3.

- Esposizione del pendio

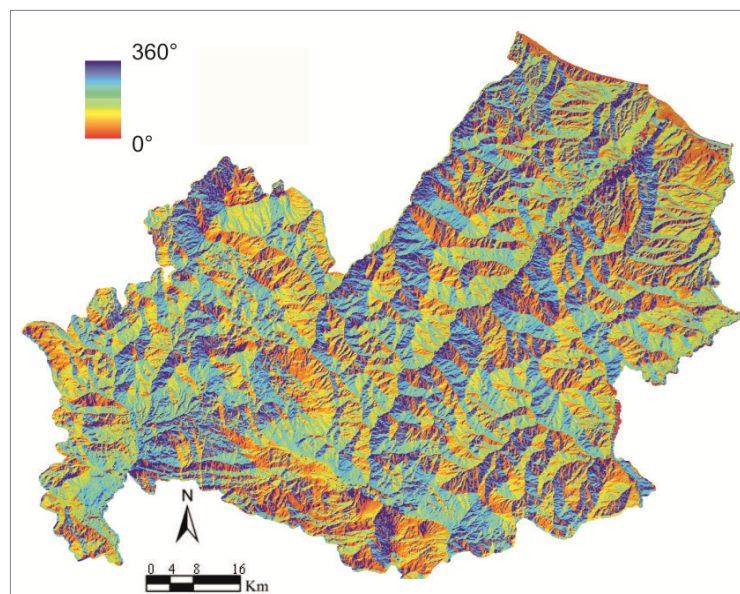


Figura 3.1-4 Esposizione del pendio

L'esposizione rappresenta l'orientazione del pendio rispetto ai punti cardinali principali. Esso rappresenta uno dei fattori più importanti per la distribuzione spaziale dei fenomeni franosi (Ercanoglu e Gokceoglu 2004; Saha et al., 2005), in quanto influenza l'azione di alcuni eventi meteorologici, come ad esempio la direzione della pioggia e la quantità di esposizione al sole del versante. Inoltre l'esposizione può avere influenza indiretta sull'alterazione, sulla vegetazione e sullo sviluppo delle radici, ed inoltre è strettamente collegata allo stato di evoluzione del reticolo di drenaggio (van Westen et al., 2008).

La mappa dell'esposizione per l'area di studio è riportata in Figura 3.1-4, e mostra l'orientazione del pendio in gradi rispetto al Nord.

- *Internal relief*

L'*internal relief* (Figura 3.1-5) rappresenta l'energia del rilievo relativa di una porzione di pendio. Esso viene calcolato come la differenza di quota tra i punti compresi in una finestra mobile di ampiezza di un ettaro (Pradhan e Kim, 2014). Inoltre, esso fornisce alcune indicazioni sulla energia potenziale dei movimenti di massa e sulla erosione del suolo (Ghimire, 2001).

In aggiunta alle variabili morfologiche, derivate dal DEM, sono state preparate una serie di mappe che rappresentano i caratteri geologici e ambientali del territorio, quali la litologia, l'uso del suolo e la distanza dai tratti stradali principali.

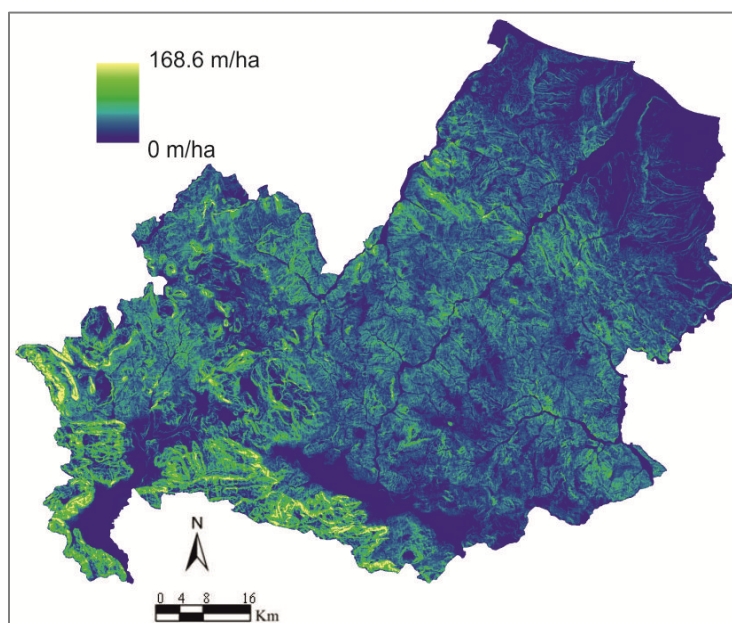


Figura 3.1-5 Internal relief

- Litologia

Le proprietà litologiche del terreno svolgono un'azione fondamentale nel controllo della distribuzione dei fenomeni franosi, in quanto litologie diverse in genere danno origine a tipi di frane diversi, con tempi di attivazione e comportamenti differenti. Per tale motivo, in questo studio è stata digitalizzata e riclassificata la mappa geologica in scala 1:100.000 di Vezzani et al. (2004) (Figura 1.2-2), al fine di ridurre il numero di classi e raggruppare le litologie con comportamenti geotecnici simili, prescindendo dalla collocazione stratigrafico-strutturale delle unità descritte nel capitolo 2. Un numero troppo elevato di classi potrebbe difatti influenzare significativamente l'analisi statistica con ricadute sulla spazializzazione della suscettibilità. L'accorpamento delle varie formazioni, derivate dalla carta geologica su citata, è stato realizzato tenendo conto del loro grado di coerenza (rocce coerenti, incoerenti, pseudocoerenti e semicoerenti) e quindi della loro suscettibilità a processi di erosione idrica e in massa.

Le classi litologiche e le classi di accorpamento da cui queste sono derivate sono descritte di seguito (i nomi e le descrizioni delle Unità e Formazioni derivano dalla legenda della Carta Geologica del Molise di Vezzani et al., 2004):

- ✓ Conglomerati e sabbie (CON): comprendono i depositi delle piane costiere e i depositi alluvionali terrazzati;

- ✓ Argille e sabbie (CLS): comprendono argille e sabbie del ciclo trasgressivo-regressivo del Pleistocene inferiore - Pliocene Superiore;
- ✓ Depositi arenaceo marnosi (MLA): alternanza di argille biancastre e sabbie e arenarie gialle delle Argille del Fortore, e depositi argilloso-arenacei e argilloso-marnosi dei membri 39a e 39b del Flysch di Agnone;
- ✓ Arenarie e conglomerati (SAN): arenarie gradate del Flysch di S. Elena, sabbie e arenarie delle Sabbie di Valle, e Flysch di Agnone;
- ✓ Calcari marnosi e marne (MLC): accorpano le marne e i calcari marnosi ad Orbulina, l'alternanza di calcilutiti e calcari marnosi bianchi della formazione di Tufillo e i calcari marnosi e le marne bianche della Formazione di Faeto;
- ✓ Argille Varicolori (VLC): melange tettonico delle Argille scagliose;
- ✓ Breccie e calcilutiti: breccie e calciruditi bioclastiche, e calciruditi con frammenti di rudiste della formazione di M. Calvello;
- ✓ Calcari e dolomie (LIM): Calcari di piattaforma indifferenziati, Calcari a rudiste, Dolomie di M. Marrone e calcilutiti, in alternanza con calcareniti e calcari marnosi della Formazione di Longano.

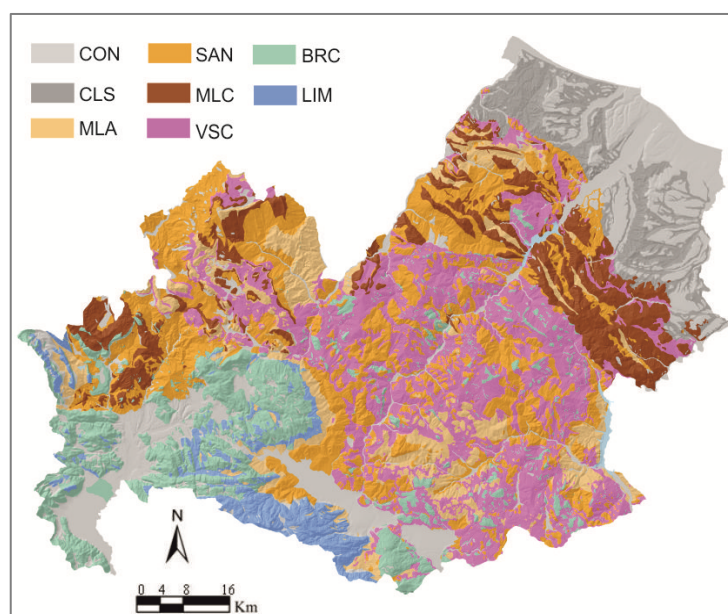


Figura 3.1-6 Mappa litologica

- Copertura del suolo

Prima di procedere con la descrizione dettagliata dei dati e dei metodi utilizzati per la mappatura, è necessaria un'essenziale premessa terminologica. Questa riguarda la distinzione dei differenti significati dei termini “uso del suolo” (*Land Use*, LU) e copertura del suolo (*Land Cover*, LC). Esistono molte definizioni di LU (Jansen, 2005) e LC. Secondo Di Gregorio e

Jansen (2000) si intende per “*land-cover*” “la copertura (bio)fisica osservata sulla superficie terrestre”. Il LU invece si riferisce al modo in cui questo assetto biofisico è utilizzato dalla popolazione (Cihlar e Jansen, 2001). Nel presente lavoro si utilizzerà il termine *land cover* (LC) o copertura del suolo secondo la definizione di Di Gregorio e Jansen (2000).

In questo lavoro per l'analisi a scala regionale è stata utilizzata per la copertura del suolo la mappa derivata dal Corine Land Cover (CLC) 2006, riclassificata in sette classi che raggruppano tipi di uso del suolo simili. Si è preferito l'uso del Corine Land Cover 2006 rispetto all'ultimo (datato 2012), al fine di avere una maggiore correlazione temporale con l'inventario IFFI, realizzato tra il 2001 e il 2005. Detto ciò, dall'accorpamento dei vari livelli del CLC sono state distinte 7 classi di uso del suolo (Figura 3.1-7) le cui modalità sono di seguito riportate:

- ✓ Zone urbane (HUS): comprendono tutte le tipologie appartenenti alla classe 1 del CLC;
- ✓ Aree a coltivo (CUL): ne fanno parte tutte le varie classi del livello 2 del CLC;
- ✓ Pascoli (PAS): sono i terreni appartenenti alla classe di terzo ordine 3.2.1 del CLC, definite come aree a pascolo naturale e praterie;
- ✓ Zone denudate (BAL): classe di secondo ordine del CLC 3.3, ossia zone aperte con vegetazione rada o assente;
- ✓ Cespuglieti (SHB): comprendono le aree associate alle classi di secondo ordine 3.2.2 (Brughiere e cespuglieti) e 3.2.4 (Aree a vegetazione boschiva ed arbustiva in evoluzione);
- ✓ Aree boscate: tutti i terreni ricadenti nella classe di secondo ordine del CLC 3.1, ossia Zone boscate;
- ✓ Zone umide (WAT): tutte quelle aree ricadenti nelle classi 4 (Zone Umide) e 5 (Corpi Idrici) del CLC.

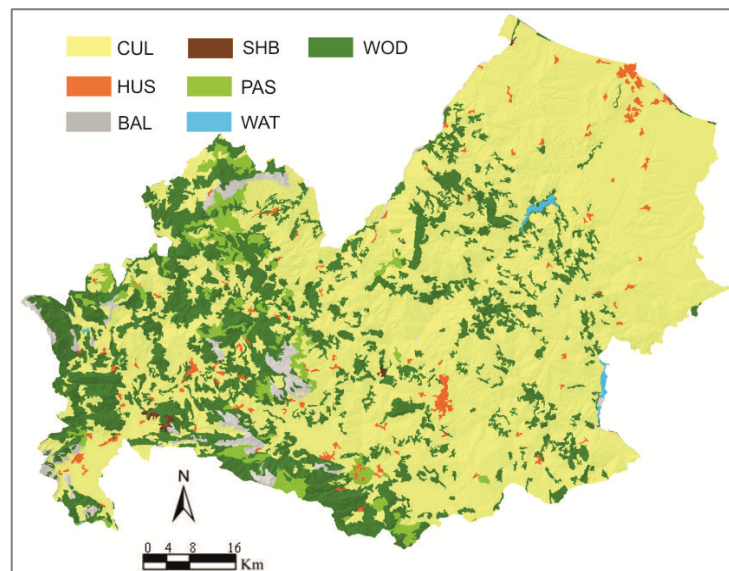


Figura 3.1-7 Carta della copertura del suolo.

- Distanza dai tagli stradali principali

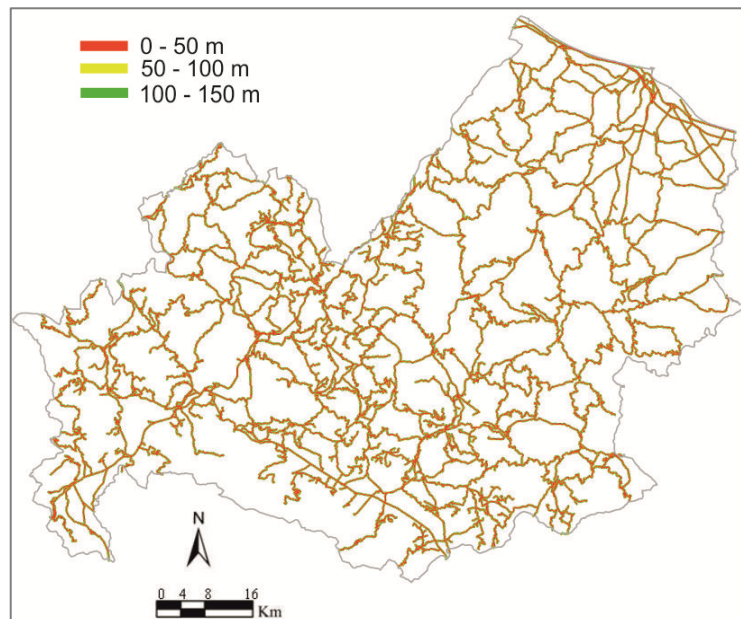


Figura 3.1-8 Distanza dai tagli stradali principali.

La distanza dai tagli stradali principali (Figura 3.1-8) viene rappresentata attraverso tre livelli: 50, 100, e 150m. L'effetto della presenza di una strada in prossimità di un pendio può risultare in una diminuzione del sostegno al piede del versante. Il cambio della topografia e della perdita del sostegno porta ad un incremento delle tensioni a monte del versante con possibile aumento dell'instabilità del terreno (Devkota et al., 2013).

Ciò può determinare un cambio dello stress interno al versante, e, di conseguenza, la comparsa di fratture di tensione che possono dare inizio a nuove instabilità, sia durante la realizzazione della strada che successivamente.

Come già accennato, le possibili conseguenze della franosità della regione sono state valutate su due tipi di elementi esposti, ossia gruppi di costruzioni (sia industriali che civili) e via di comunicazione principali (strade e ferrovie) (Figura 3.1-9 e Figura 3.1-10).

Gli edifici, i binari ferroviari, e le strade principali sono stati estratti in formato vettoriale dalle Carte Tecniche Regionali (CTR) della Regione Molise. In questa valutazione i centri abitati sono considerati come gruppi di edifici, senza alcuna distinzione per quanto riguarda la destinazione d'uso, ossia industriale o residenziale. Per le linee stradali sono state selezionate solo quelle asfaltate, importanti per il collegamento di due o più aree abitate, e classificate come strade statali, regionali, provinciali e comunali; le tratte ferroviarie attive sono state considerate interamente. Le mappe ottenute sono presentate nel seguito.

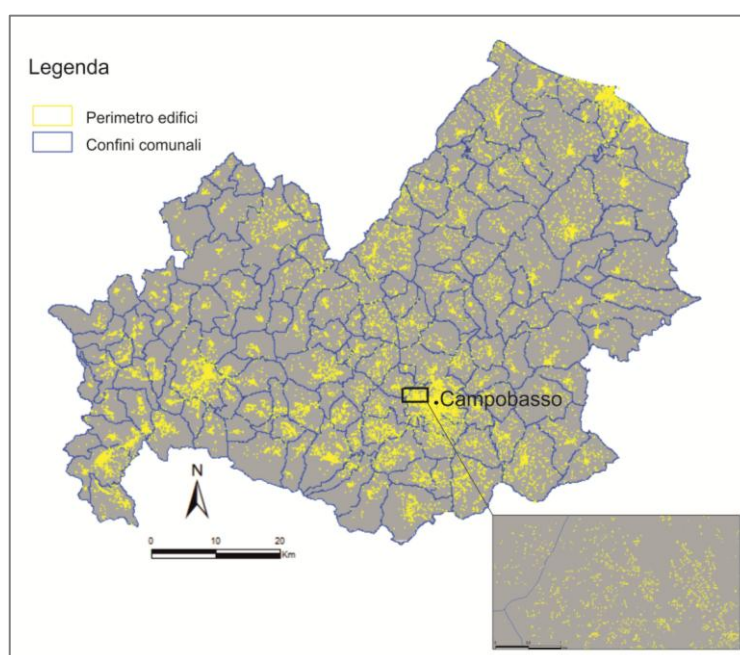


Figura 3.1-9 Perimetro delle zone edificate. Il riquadro rappresenta un ingrandimento della zona di Campobasso.

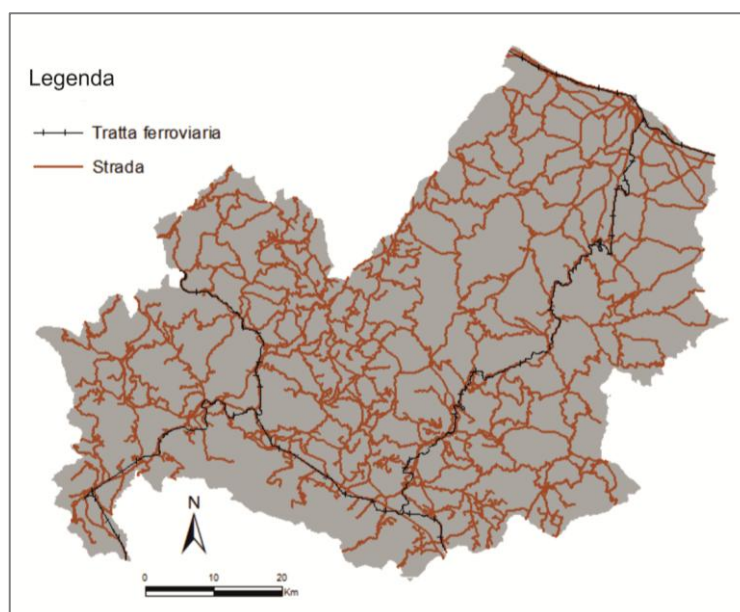


Figura 3.1-10 Strade e tratte ferroviarie.

3.1.2 Metodi utilizzati per l'analisi della suscettibilità da frana

Nonostante la mole di dati a disposizione e la mappatura di base prodotta per l'inventario dei fenomeni franosi (IFFI), una mappa della suscettibilità da frana a livello regionale nel Molise non è mai stata ufficialmente presentata nella letteratura scientifica. Tale analisi rappresenta il primo passo verso un più completo esame della pericolosità e del rischio da frana, e risulta necessaria quale strumento che possa contribuire a un'efficace prevenzione dei rischi idrogeologici.

La suscettibilità da frana a scala regionale è stata ottenuta dall'applicazione di due metodi statistici molto noti e utilizzati in letteratura, con dimostrata validità statistica dei risultati, di cui uno bivariato, ossia la *Weight of Evidence* (Bonham-Carter et al., 1989), ed uno multivariato, ossia la *Stepwise-Forward Logistic Regression* (Hosmer e Lemeshow, 2000). La ragione per cui sono stati usati questi due metodi diversi per l'analisi risiede nel fatto che lo studio è volto a creare una mappa di suscettibilità soddisfacente con l'intento di rappresentare quanto più fedelmente possibile la reale criticità dell'area di studio.

3.1.2.1 Il metodo *Weight of Evidence*

Il metodo *Weight OF Evidence* (WOFE) è un approccio di modellazione molto conosciuto e largamente utilizzato in molti campi scientifici a partire dagli anni '90 (Weed, 2005; Dube et al., 2014; Sujatha et al., 2014; Khosrovyan et al., 2015), in particolare negli studi sulle frane (van Westen, 1993; Chung e Fabbri, 2003; van Westen et al., 2003; Thiery et al., 2007; Regmi et al., 2010; Sterlacchini et al., 2011; Petschko et al., 2014).

Il metodo WOFE è stato originariamente sviluppato per la diagnostica medica, in cui le variabili consistevano in un insieme di sintomi e l'ipotesi da verificare era del tipo "questo paziente ha la malattia x". Per ogni sintomo è calcolata una coppia di pesi, uno per la presenza del sintomo, e uno per la sua assenza. L'entità dei pesi dipende dalla relazione misurata tra il sintomo e la malattia in un ampio gruppo di pazienti. I pesi possono quindi essere utilizzati per stimare la probabilità che un nuovo paziente contrarrebbe la malattia, in base alla presenza o assenza di sintomi.

La WOFE è stata adattata alla fine del 1980 per la mappatura di determinati minerali mediante l'utilizzo del GIS. In questa situazione, le variabili note sono rappresentate da un insieme di gruppi di dati di esplorazione (mappe), e l'ipotesi da esaminare è "questa posizione è favorevole per la presenza del deposito di tipo x". I pesi sono ottenuti in questo caso dall'associazione misurata tra le occorrenze di minerali noti e dei valori sulle mappe da utilizzare come predittori. L'ipotesi è poi ripetutamente valutata per tutte le possibili posizioni sulla mappa utilizzando i pesi calcolati, producendo una mappa della potenziale presenza del minerale, in cui sono combinate le prove relative ai diversi fattori (Bonham-Carter et al., 1989). Si tratta di un modello di probabilità bayesiana *data-based*, che utilizza le occorrenze note come set di dati di *training* per ricavare un *output* predittivo. Quest'ultimo è generato dai pesi delle evidenze note, che influenzano la distribuzione spaziale delle variabili predette nell'area di studio (Raines, 1999). La WOFE calcola la probabilità a priori (incondizionata) e a posteriori (condizionale). La probabilità a priori rappresenta la densità dei punti di *training* nell'area di studio (cioè, la probabilità che un pixel contenga un evento che si basa solo sul numero dei punti di *training*, non considerando né la loro posizione né le variabili condizionanti). La probabilità a posteriori rappresenta la probabilità relativa che un pixel contenga un evento sulla base di nuove evidenze, fornite dalle variabili condizionanti. Il metodo si basa sul calcolo dei pesi positivi e negativi (W^+ e W^- ; si veda le Equazione 3.1-1 e Equazione 3.1-2) che valutano il grado di associazione spaziale tra i punti di *training* e di ogni classe delle variabili condizionanti. Se la classe è correlata positivamente, W^+ è positivo e W^- è negativo. Se la classe è correlata negativamente, W^- è positiva e W^+ è negativa.

Equazione 3.1-1

$$W^+ = \ln \frac{P(B|N)}{P(B|\bar{D})}$$

Equazione 3.1-2

$$W^- = \ln \frac{P(\bar{B}|N)}{P(\bar{B}|\bar{D})}$$

dove: W^+ e W^- sono i pesi calcolati, $P()$ è la probabilità; \ln è logaritmo naturale; N rappresenta il numero di celle unitarie; D indica il numero di punti di *training*; \bar{D} indica l'assenza di punti di *training*; B denota variabili condizionanti e \bar{B} denota l'assenza della variabili condizionanti. La differenza tra il valore W positivo (W^+) e negativo (W^-) definisce il grado di associazione spaziale tra la classe tematica analizzata e ciascuna classe di ogni variabile cartografica e viene definito come *Contrast* ($C = (W^+) - (W^-)$).

In questo lavoro il metodo è stato applicato usando Arc-SDM (*Spatial Data Modeler*; Sawatzky et al., 2009), uno strumento di *geoprocessing* per ambiente GIS, che permette di produrre un numero relativamente elevato di prove in breve tempo. Sono state preparate una serie di variabili condizionanti, che sono state valutate come significative per il caso di studio. Tali variabili sono la pendenza, l'esposizione del pendio (ossia l'orientazione media rispetto al Nord) e il rilievo interno estratto da un DTM 20x20 m, come più ampiamente descritto nel paragrafo precedente.

Le variabili ottenute sono state tutte riclassificate in 10 classi con distribuzione quantile, ad eccezione dell'esposizione che è stata riclassificata in nove classi (le principali otto direzioni dei punti cardinali, più una classe per aree pianeggianti). La carta geologica in scala 1:100.000 della Regione Molise (Vezzani et al., 2004) e il livello delle coperture di uso del suolo sono stati utilizzati secondo l'accorpamento delle classi sopra descritto. La distanza dalle strade è stata rappresentata con tre *buffers* di 50, 100 e 150 m. Le frane sono state estratte dall'inventario IFFI, e sono state rappresentate mediante un solo pixel associato al centroide del poligono di frana. La rappresentazione di una frana attraverso un solo punto (pixel) è una procedura largamente utilizzata in letteratura (Van Den Eckhaut, 2006; Thiery, 2007; Yilmaz, 2010; Piacentini et al., 2012; Regmi et al., 2014). Tale scelta, in questo studio, è stata inoltre guidata dal fatto che si è in presenza di un database molto ampio (circa 21000 frane). Come dimostrato da Hussin et al. (2016), aumentando eccessivamente la rappresentazione, ad esempio con un numero maggiore di punti per ogni frana, la performance dell'analisi non viene migliorata in maniera significativa. Bisogna inoltre considerare che l'eccessivo numero di punti porta ad un notevole rallentamento dell'analisi, specialmente nell'utilizzo del *tool* ArcSDM in ambiente GIS.

Una fase fondamentale dell'analisi di suscettibilità, come descritto in Chung e Fabbri (2003), è la validazione dei modelli. Al fine di validare i modelli bisogna creare un dataset di punti estraneo a quello utilizzato per istruire il modello (*training*). Come descritto in Pourghasemi et al. (2014), esistono essenzialmente tre tecniche statistiche per ottenere il *dataset* di punti indipendenti da utilizzare nella fase di validazione: 1) l'inventario originale viene diviso in due sottogruppi; 2) l'area studio viene divisa in due parti ed i punti da esse estratti vengono usati distintamente per l'analisi e la validazione; 3) l'analisi viene condotta utilizzando punti frana di

un certo periodo di tempo, mentre la validazione avviene mediante punti relativi ad un altro periodo.

Per questa analisi sono stati effettuati otto test come mostrato in Tabella 3.1-1, utilizzando il 50% di punti del *dataset* di frana come *training*, in un primo gruppo di prove e il 10 % in un secondo gruppo. Inoltre, per la validazione, sono stati estrapolati altri due set aventi lo stesso numero di punti dei precedenti (50% e 10%). Tutti i punti sono stati campionati in maniera *random* in ambiente GIS (esempio in Figura 3.1-11).

Per l'analisi inoltre sono stati combinati i sette fattori condizionanti scelti, utilizzando i due set di *training* descritti. Pendenza, esposizione, rilievo interno, litologia e uso del suolo sono stati utilizzati in tutte le combinazioni, mentre la vicinanza ai tagli stradali e l'altitudine sono stati inseriti in alternativa, poiché da un'analisi preliminare si è osservato che questi due fattori vanno ad influenzare in maniera negativa la performance del modello (vedi par. 4.1). Ogni performance è stata valutata a posteriori, attraverso il set di validazione, utilizzando la ROC (*Receiver Operating Curve*), che rappresenta la curva ottenuta riportando in grafico i valori di sensitività (Se) in relazione ai valori di 1-specificità (Sp) che variano al variare dei parametri del modello.

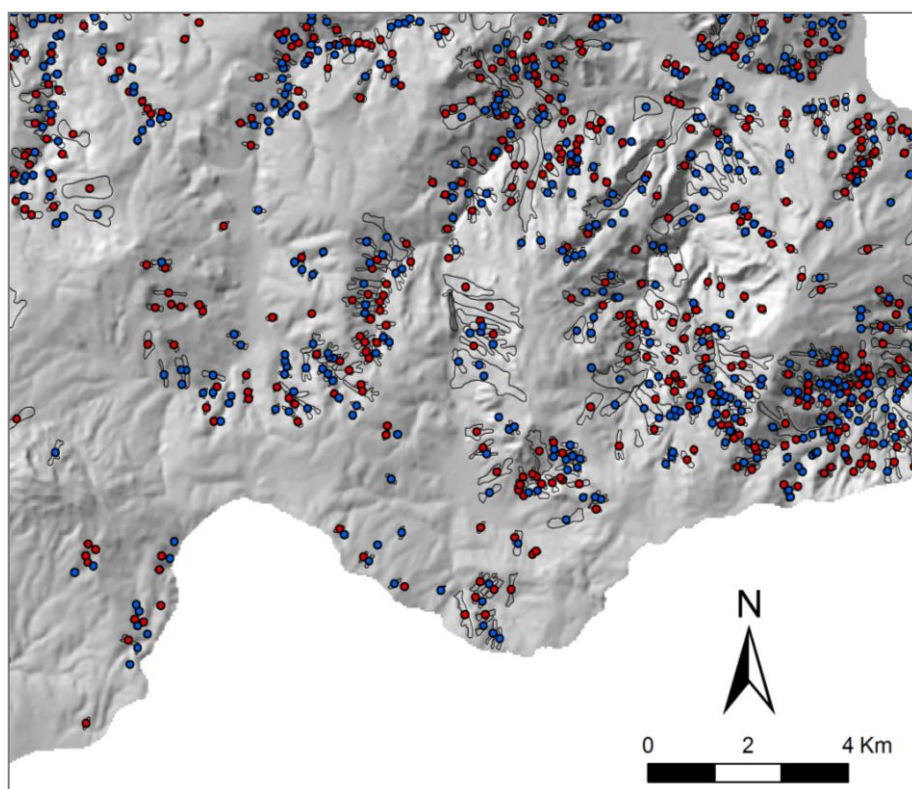


Figura 3.1-11 Esempio di un'area in cui sono rappresentati i punti di training (rosso) e di validazione (blu) all'interno dei corpi di frana (poligoni in nero)

In particolare, la sensitività è definita dal rapporto fra il numero di punti realmente ricadenti in frana, correttamente stimati come in frana (vero positivo, TP) e quello totale di punti ricadenti in

aree instabili (vero positivo + falso negativo = TP+FN), ovvero: $TPR = TP/P = TP/(TP+FN)$. Il parametro 1-specificità (FPR) è invece definito dal rapporto fra il numero di aree correttamente classificate come stabili (vero negativo, TN) e il numero totale di unità territoriali stabili (vero negativo + falso positivo = TN+FP), ovvero: $FPR = FP/N = FP/(TN+FP)$. Per la costruzione della curva ROC sono stati presi dunque, oltre ai punti di validazione, uno stesso numero di punti in aree non mappate in frana, definite come aree stabili.

Infine, è stata individuata la migliore mappa in termini di area sottesa dalla curva (AUC) della ROC, e riclassificata in cinque classi (molto bassa, bassa, media, alta e molto alta), utilizzando il metodo del quantile; questa è stata poi confrontata con quella ottenuta con il metodo statistico multivariato. La rappresentazione delle classi mediante il metodo del quantile nei modelli WOFI permette di esplorare meglio il comportamento dei fattori rispetto all'occorrenza di una frana, perché le classi delle variabili in questa maniera risulteranno proporzionalmente distribuite (Blahut et al., 2010).

Tabella 3.1-1 Combinazione dei fattori utilizzati per l'analisi di suscettibilità.

	Pendenza	Esposizione	Litologia	Land cover	Internal relief	Prossimità alle strade	Altitudine	
T1	V	V	V	V	V	V	V	50% dei punti frana
T2	V	V	V	V	V		V	
T3	V	V	V	V	V	V		
T4	V	V	V	V	V			
T5	V	V	V	V	V	V	V	10% dei punti frana
T6	V	V	V	V	V		V	
T7	V	V	V	V	V			
T8	V	V	V	V	V	V		

3.1.2.2 Il metodo della *Logistic Regression*

In aggiunta al metodo bivariato, la probabilità spaziale dell'occorrenza di fenomeni franosi in Molise è stata valutata anche utilizzando un metodo statistico multivariato, anch'esso molto ben conosciuto e largamente utilizzato, ossia la regressione logistica lineare (o *linear logistic regression*) di tipo *stepwise forward* (Hosmer e Lemeshow, 2000). Uno dei vantaggi di questo metodo rispetto al precedente è che non risente della dipendenza condizionale che può esserci tra le variabili del modello (Agterberg et al., 1993). La regressione logistica va a misurare la relazione tra la variabile dicotomica (presenza/assenza di frana, o frana/non frana) rispetto ad una serie di variabili predittive. La funzione è descritta dall'equazione:

Equazione 3.1-3

$$P = 1/(1 + e^{-Z})$$

dove: P è la probabilità spaziale di occorrenza di una frana e z è data dalla seguente equazione:

$$\text{Equazione 3.1-4} \quad z = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n;$$

dove: β_0 è l'intercetta della retta descritta dalla funzione; β_n rappresenta il coefficiente stimato per la variabile predittiva; e X_n è la variabile predittiva.

La procedura applicata in questo studio prevede diversi passaggi, tra i quali innanzitutto vi è la preparazione delle mappe da utilizzare come variabili indipendenti, ossia i fattori condizionali che maggiormente determinano l'occorrenza di frane nell'area di studio. Per questo motivo gli stessi livelli (*layers*) usati nella WOFE sono stati introdotti in questo modello, ma classificati usando uguali intervalli di valori (*equal interval classification* in ArcGis). Successivamente, considerando una delle premesse fondamentali del modello di regressione logistica lineare, ossia che la probabilità ha una relazione lineare con le variabili indipendenti (Kleinbaum e Klein, 2002; Domínguez-Cuesta et al., 2010), le variabili scelte sono state normalizzate seguendo la densità percentuale di area in frana in ogni classe come suggerito da diversi autori (Ayalew e Yamagishi, 2005; Lee e Pradham, 2007; Bai et al., 2010a; Erenner et al., 2010; Yalcin et al., 2011; Iovine et al., 2014).

La densità viene calcolata per ogni singola classe di ciascuna delle variabili predittive (fattori predisponenti) attraverso il rapporto tra la superficie dell'area in frana e l'estensione totale della classe nell'area di studio. In seguito, questi rapporti vengono divisi per la loro sommatoria (Ayalew e Yamagishi, 2005).

Tale passaggio è preferibile in quanto, in presenza di variabili linguistiche (es. geologia, uso del suolo), esse devono essere trasformate in valori numerici (Wang et al., 2013), ed inoltre permette di semplificare l'equazione di regressione evitando l'uso di un eccessivo numero di variabili *dummy* (0,1). Il risultato permette di sfruttare la cosiddetta conoscenza a-priori della franosità (Carrara, 1983; Bai et al., 2010b) in quanto i valori normalizzati nelle classi rispecchiano la maggiore/minore predisposizione all'occorrenza di frane. La *stepwise-forward* del modello di regressione logistica permette inoltre di escludere durante la iterazione del modello le variabili con scarsi valori predittivi. Questo consiste nell'aggiungere al modello una variabile per volta, al fine di verificare se i coefficienti di regressione delle variabili già incluse sono singolarmente non significativi a causa della forte correlazione con la nuova variabile. Pertanto dopo l'inserimento di ciascuna variabile il modello viene riconsiderato per verificare se vi è qualche variabile da eliminare.

E' essenziale per i modelli multivariati, selezionare punti rappresentativi delle aree in frana e delle aree stabili. Le frane sono state rappresentate con un solo punto (centroide) all'interno dell'area di frana, ed i punti di frana/non frana sono stati presi in egual numero e campionati in maniera casuale. Tale suddivisione è quella più largamente suggerita dalla letteratura (Süzen e Doyuran, 2004; Yesilnacar e Topal, 2005; Van Den Eeckhaut et al., 2006; Tunusluoglu et al., 2008; Mancini et al., 2010) in quanto è stato dimostrato che la regressione logistica può sopra/sottovalutare i dati osservati, parallelamente alla differenza di dimensioni tra i campioni con e senza frane (Van Den Eeckhaut et al., 2006; Thiery, 2007). Per questa analisi il campionamento dei punti frana/non frana è stato effettuato prima considerando il 50% dell'intero *dataset*, e successivamente prendendone in considerazione solo il 10%. Si è scelto di operare in tale modo considerando il numero molto elevato di punti di frana all'interno del *dataset*, e quindi al fine di rendere l'operazione più rapida e di leggera esecuzione in ambiente GIS. E' noto, inoltre, che le principali criticità della regressione logistica sono connesse a eventuali ridondanze, generate da *training set* troppo corposi, e alla qualità e al dettaglio dei dati di input (Greco et al., 2013).

I valori dei coefficienti β e dell'intercetta β_0 , dell'Equazione 3.1-4 sono stati calcolati mediante il software statistico Xlstat (<https://www.xlstat.com/en/>), mentre la mappa finale di suscettibilità è stata ottenuta mediante l'utilizzo del software ArcGis10.1 attraverso l'applicazione dell'Equazione 3.1-3 nel tool "*Raster Calculator*". Infine, la bontà delle analisi svolte è stata valutata utilizzando, come per il metodo precedente, il calcolo dell'area sottesa dalla curva (AUC) della ROC (*Receiver Operating Curve*), utilizzando come set di validazione i punti in frana non utilizzati per la creazione del modello e un pari numero di punti *random* ricadenti in aree stabili.

Inoltre l'uso della regressione logistica fornisce valori di probabilità compresi tra 0 e 1, dunque le varie classi di suscettibilità sono state suddivise usando 5 intervalli equamente distribuiti attraverso il metodo *equal interval classification* in ArcGis. Le 5 classi ottenute sono state definite nella mappa di *output* come molto bassa, bassa, media, alta e molto alta.

3.1.3 Metodo utilizzato per l'analisi dell'esposizione degli elementi a rischio frana

Allo scopo di analizzare in maniera preliminare la severità con cui la presenza di fenomeni franosi interagisce, in termini di probabilità spaziale, con la zona abitata e le vie di comunicazione, è stata condotta un'analisi dell'esposizione di tali elementi al rischio da frana. L'applicazione vuole essere un'analisi sostitutiva ma rappresentativa del livello di rischio che

potrebbe occorrere nel caso del verificarsi di fenomeni franosi. L'uso dell'esposizione, in alternativa ad un'analisi quantitativa del rischio da frana per la regione Molise, è determinata dal fatto che per l'area oggetto di studio non sono disponibili informazioni sufficienti a determinare la probabilità temporale dell'occorrenza e la magnitudo associata dei fenomeni franosi, e dunque ad esprimerla in termini di pericolosità.

L'analisi dell'esposizione qui presentata si esplica attraverso la sovrapposizione spaziale della mappa di suscettibilità da frana e della mappa degli elementi esposti come proposto in diversi studi pregressi (Pellicani et al., 2013; Promper et al., 2015; Promper e Glade, 2016). In questo modo è possibile avere una stima dell'estensione areale degli elementi che ricadono in ciascuna classe di suscettibilità. Per l'analisi è utilizzata la mappa di suscettibilità ottenuta con l'applicazione del metodo statistico di regressione logistica, presentata in Pisano et al. (2016a). Tale mappa è stata preferita a quella ottenuta dalla WOFI, in quanto ritenuta più rappresentativa per l'area di studio (vedi paragrafi successivi).

La seconda componente necessaria per l'analisi è rappresentata dalla perimetrazione degli elementi esposti. La mappa vettoriale degli edifici, le tratte ferrate, e le strade principali sono stati estratti dalle Carte Tecniche Regionali (CTR) della Regione Molise, come descritto in precedenza.

Una prima valutazione è stata effettuata stimando gli elementi a rischio intersecanti le cinque classi di suscettibilità come termini assoluti. Inoltre, per ciascun comune è stata calcolata l'area degli edifici e la lunghezza di strade e ferrovie che ricadono nelle classi di suscettibilità alta e molto alta. Infine è stata valutata la percentuale degli elementi esposti ricadenti nelle classi a maggiore suscettibilità, rapportando l'area totale degli edifici ricadenti nelle classi di suscettibilità alta e molto alta con l'area totale degli edifici nel comune. In seguito, ciò è stato realizzato anche per gli altri due elementi considerati, ovvero strade e tratte ferrate.

Infine sono stati evidenziati i comuni che hanno l'area percentuale più alta di esposizione ed i risultati ottenuti sono stati quindi confrontati con l'indicatore SMD per verificare possibili corrispondenze.

3.1.4 Metodo utilizzato per il calcolo dell'indice di malessere demografico (SMD)

Al fine di delineare l'incidenza dei fenomeni franosi sulle dinamiche della popolazione (in termini di malessere o emigrazione), è stato calcolato un indicatore demografico denominato SMD (stato di malessere demografico) (Bottazzi et al., 2006; Bottazzi e Puggioni, 2013), in

grado di valutare qualitativamente lo stato di malessere o benessere della popolazione e della sue dinamiche a scala comunale.

L'indicatore proposto da Bottazzi e Puggioni (2013), difatti, riconduce il fenomeno non solo ai singoli episodi occasionali di spopolamento, ma valuta anche altre dinamiche demografiche presenti in un territorio. Ad esempio, esso tiene in considerazione la composizione della popolazione divisa per fasce di età, il bilancio demografico rispetto alle nascite ed alla mortalità, e la variazione della popolazione nell'arco di 50 anni, dal 1951 al 2011 (Bottazzi e Puggioni, 2013).

I dati iniziali di input per ricavare i parametri essenziali per l'indice SMD sono stati estratti dal censimento della popolazione ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica) dal 1951 al 2011 (ISTAT 1954, 1963, 1972, 1982, 1992, 2001, 2011, 2012).

L'SMD è infatti un indicatore composito che usa un numero di parametri statistici; esso può dare una buona indicazione sullo stato di salute di una popolazione, ed è espresso dalla seguente equazione:

$$\text{Equazione 3.1-5} \quad SMD = svnp1 + ism$$

dove *svnp1* rappresenta il peso degli episodi di spopolamento (SSI), mentre *ism* fa riferimento a 4 caratteristiche della popolazione, che esprimono la sua struttura e il suo movimento naturale, in grado di fornire sicure indicazioni sullo stato di salute di una popolazione.

Bottazzi e Puggioni (2013) intendono come episodio di spopolamento (SSI) una diminuzione del numero di abitanti dei comuni tra un censimento e il successivo.

Il termine *svnp1* dell'Equazione 3.1-5, a sua volta è dato dalla seguente formula:

$$\text{Equazione 3.1-6} \quad svnp1 = SVN1 + (cg1, i \text{ e } cg2, i)$$

dove

$$\text{Equazione 3.1-7} \quad SVN1 = \sum_{i=1}^6 1 \cdot p_i$$

La valutazione del peso (p_i) rientra in un campo variabile tra 1 e 6. Infatti esso è dipendente da ogni episodio di spopolamento in un intervallo intercensuario decennale (es. 1951-1961). Ogni intervallo censuario avente una diminuzione di popolazione è caratterizzato da un valore 1; ogni intervallo non avente un decremento del numero degli abitanti assume valore 0. Quindi ad esempio se un determinato comune ha avuto sempre una diminuzione in termini di abitanti nei sei intervalli intercensuari analizzati (dal 1951 al 2011), allora il valore del peso (p_i) risulta

essere quello massimo, cioè 6. Se invece non vi è stato alcun decennio che ha segnato un decremento della popolazione il valore del peso (p_i) associato sarà uguale a 0.

L'Equazione 3.1-5 diventa pertanto:

$$\text{Equazione 3.1-8} \quad svnp1 = \sum_{i=1}^6 1 * p_i + (cg_{1,i} + cg_{2,i})$$

Per tenere conto della differente entità dei tassi di diminuzione della popolazione in base alla collocazione temporale dello spopolamento (più recente o meno), l'Equazione 3.1-5 è stata integrata aggiungendo la somma dei coefficienti di gravità (cg) corrispondenti all'importanza assegnata ai decrementi registrati per l'intero periodo 1951-2011 ($cg_{1,i}$) e per l'ultimo intervallo intercensuario 2001-2011 ($cg_{2,i}$).

Sulla base dell'entità della diminuzione del numero di abitanti sono stati stabiliti, secondo una scala da 1 a 5 punti, dei coefficienti di gravità (cg) (vedi Tabella 3.1-2 e Tabella 3.1-3)

Tabella 3.1-2 Valori di cg_1 calcolati sulla percentuale di depopolamento (per tutto l'intervallo 1951-2011)

Quota di depopolamento	cg_1
$D > 60\%$	5
$45\% < D < 60\%$	4
$30\% < D < 45\%$	3
$15\% < D < 30\%$	2
$D < 15\%$	1
Aumento di popolazione	0

Tabella 3.1-3 Valori di cg_2 calcolati sulla percentuale di depopolamento (calcolato nell'ultimo intervallo intercensuario 2001-2011)

Quota di depopolamento	cg_2
$D > 20\%$	5
$15\% < D < 20\%$	4
$10\% < D < 15\%$	3
$5\% < D < 10\%$	2
$D < 5\%$	1
Aumento di popolazione	0

Per la determinazione del valore ism sono stati invece utilizzati i quattro rapporti di coesistenza e l'indice di eccedenza riportati in Tabella 3.1-4. La normalizzazione dei quattro indici è stata effettuata utilizzando come massimi e minimi quelli empiricamente osservati per ciascuno di essi a cui successivamente è stato applicato il calcolo della media aritmetica (Bottazzi e Puggioni, 2013).

Tabella 3.1-4. Indici per la determinazione del termine ism

Indice di eccedenza dei nati (N) sui morti (M) nel periodo tra dal 2001 al 2011	$ESN = \frac{N - M}{N + M} \cdot 100$
Indice di vecchiaia: rapporto tra il numero di persone con età superiore ai 65 anni rispetto a 100 abitanti con età compresa tra 0-14.	$IV = \frac{P_{65-\Omega}}{P_{0-14}} \cdot 100$
Indice di squilibrio generazionale primario: rapporto tra le persone maggiori di 65 anni e il numero di bambini inferiori ai 5 anni, registrati al 2001.	$AB = \frac{P_{65-\Omega}}{P_{0-4}}$
Indice di dipendenza totale dei presunti non attivi: deriva dalla somma dei giovani inferiori ai 15 anni e la popolazione superiore ai 65 anni in rapporto con la somma delle persone avente età compresa tra i 15 e i 65 anni. Si tratta di un indice strettamente demografico ma che fornisce una misura abbastanza attendibile del peso sociale che agisce sul reddito prodotto dalla forza lavoro teorica	$ID = \frac{P_{0-14} + P_{65-\Omega}}{P_{15-64}} \cdot 100$

Infine essendo l'SMD un indice relativo che assume valori tra 0 e 200, in base al numero ricavato dalla somma dei termini dell'Equazione 3.1-5 si è proceduto alla classificazione dei comuni secondo cinque categorie. Le classi così ottenute sono riportate in Tabella 3.1-5.

Tabella 3.1-5 Classi di SMD e relativi range di valori

Stato di salute della popolazione	Valore di SMD
Buona	= 20
Discreta	40,1 - 80
Precaria	80,1 - 120
Grave	120,1 - 160
Gravissima	> 160

3.2 Analisi a scala di bacino

Dopo aver analizzato la pericolosità da frana a scala regionale in Molise, tenendo in considerazione gli obiettivi dello studio e in base ai dati e materiali già a disposizione, l'attenzione è stata volta verso un'analisi di maggiore dettaglio per il bacino del Rivo. L'area del bacino del Rivo, in relazione alle sue caratteristiche morfo-dinamiche, climatiche, geopedologiche e socio-economiche, è rappresentativa del territorio rurale del settore medio-alto collinare del versante adriatico molisano. Esso è situato sulla parte esterna del versante adriatico dell'Appennino molisano e rappresenta uno dei principali bacini tributari in destra idrografica del Fiume Trigno.

Inoltre lo stesso bacino è caratterizzato da molteplici fenomeni franosi, e i dati ufficiali estrapolati dal progetto di ricerca IFFI (APAT 2007), identifica al suo interno circa 1.481 frane, la maggior parte delle quali classificate come “*Earth flow*” e “*Complex Earth slide – Earth flow*”

(*sensu* Cruden e Varnes, 1996) rappresentate principalmente da scorrimenti che, nella parte distale, evolvono a colata di terra.

La scelta di questa area di studio per l'analisi di maggiore dettaglio risiede quindi nel fatto che essa, seppure relativamente di piccole dimensioni (~82kmq), racchiude un'alta concentrazione di fenomeni franosi e le caratteristiche più esplicative del territorio rurale molisano.

Il bacino è stato quindi analizzato al fine caratterizzare i fenomeni franosi e loro condizioni ambientali di sviluppo, focalizzando l'attenzione sull'analisi tra le variazioni spaziali e temporali di innesco, in relazione ai cambiamenti delle coperture del suolo occorsi in un arco di tempo di circa sessanta anni.

Pertanto di seguito sono presentati i dati che sono stati raccolti da fonti pre-esistenti, e si presenteranno poi i metodi (mappatura multi-temporale dei fenomeni franosi e dell'uso del suolo, e scenari futuri di uso del suolo) con cui nuovi dati sono stati preparati per l'area di studio. Inoltre, verranno esplicitati i metodi utilizzati per l'analisi multi-temporale della suscettibilità da frana, sia per il passato che per scenari futuri attesi in corrispondenza di cambiamenti di copertura del suolo. Infine, considerando la vocazione principalmente agricolo-rurale della regione, ed osservando come i fenomeni franosi vadano periodicamente a coinvolgere terreni non abitativi, ma comunque di importante valore per l'economia dell'area, verrà analizzato il danno economico e agricolo derivante dall'instabilità dei versanti.

3.2.1 Preparazione dei dati

La prima fase dell'analisi a scala di bacino consiste nella raccolta e preparazione dei dati utili disponibili da fonti pre-esistenti. Sono state preparate delle mappe in formato raster che rappresentano le principali caratteristiche morfologiche del territorio, ossia (Figura 3.2-1):

- Inclinazione del pendio
- *Internal relief*
- Esposizione
- Altitudine

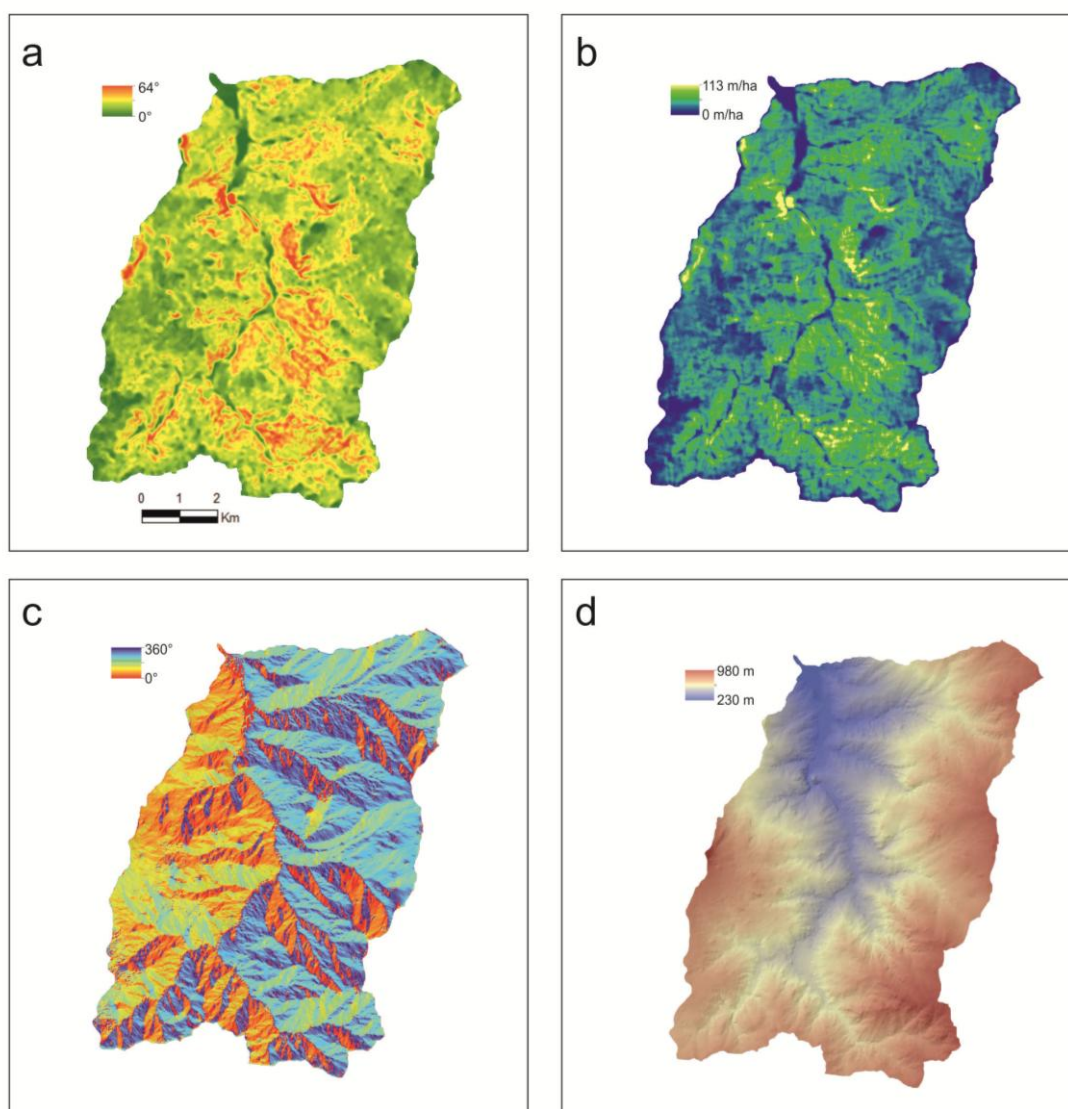


Figura 3.2-1 Fattori morfologici derivati dal DEM per il bacino del Rivo; a. Inclinazione; b. Internal relief; c. Esposizione; d. Altitudine

Le unità di misura e significatività di tali caratteristiche replicano quanto già detto per le analisi a scala regionale, così come la loro importanza per l'area di studio ed il tipo di analisi condotta. Tali mappe sono state derivate da DEM (*Digital Elevation Model*) a risoluzione 5x5 m, prodotto dalla digitalizzazione delle curve di livello e dei punti quotati estratti dalla carta tecnica regionale in scala 1:5000.

La litologia è stata rappresentata da una mappa geolitologica derivata dal foglio geologico n. 393 “Trivento” della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50000, realizzata nel contesto del progetto nazionale CARG (CARTografia Geologica), reperibile al link:

(http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/393_TRIVENTO/Foglio.html).

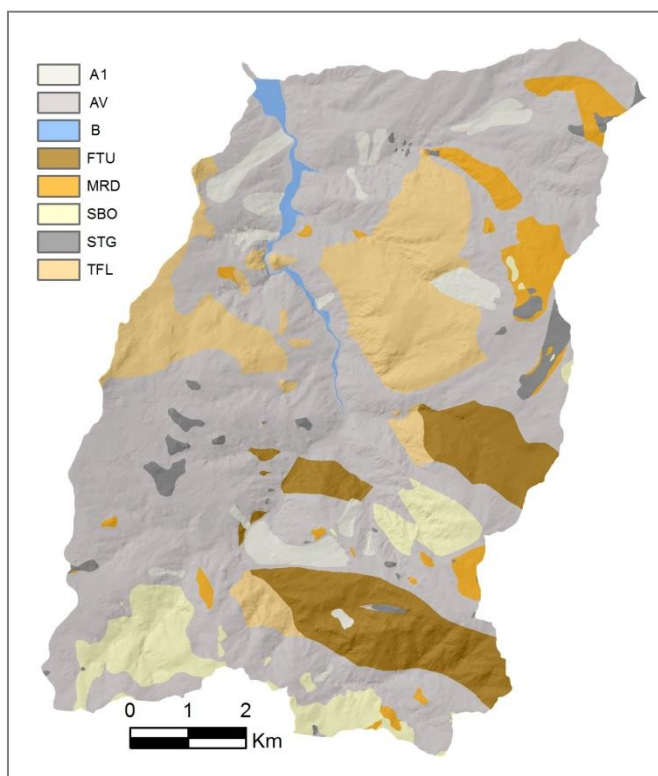


Figura 3.2-2 Mappa geolitologica.

La mappa è stata riclassificata al fine di semplificare il numero di classi, raggruppando formazioni aventi caratteristiche litologiche simili (vedi Figura 3.2-2). Le classi litologiche e le classi di accorpamento da cui queste sono derivate, sono descritte di seguito (i nomi e le descrizioni delle Unità e Formazioni sono state acquisite dalla legenda del Foglio Geologico CARG sopracitato e dalle relative note illustrative):

- Depositi di frana (A1): da questi sono stati discretizzati solo i depositi di frana stabilizzati;
- Argille Varicolori (AV): argille variegate con colorazione rosso mattone, verde, nocciola, grigio e giallo, in strati di spessore variabile dal centimetro al decimetro;
- Depositi alluvionali (B): depositi alluvionali attuali e terrazzati recenti, appartenenti entrambi all'Olocene;
- Calcareni e Marne (FTU): alternanza di calcareniti bianche fini e marne chiare in livelli di circa 80 cm, appartenenti al Flysch di San Biase;
- Marne e marne scistose (MRD): alternanza di marne bianche, marne scistose rosse e verdi ed argille delle Marne rosse e verdi di Colle Dolce;
- Argille marnose e marne argilloso-siltose (SBO): appartenenti al Flysch di San Bartolomeo e a luoghi caratterizzate da banconi arenacei;

- Calcareniti e breccie calcaree (STG): membro di alcune decine di metri ricadenti all'interno delle Argille Varicolori Superiori;
- Calcilutiti, calcareniti e breccie calcaree (TFL): appartenenti alla Formazione di Tuffillo.

La distanza dai tagli stradali è stata rappresentata attraverso 4 livelli di *buffers* (50, 100, 150 e >150 m). Le strade principali sono state mappate mediante osservazione delle ortofoto degli anni 1954, 1981 e 2007.

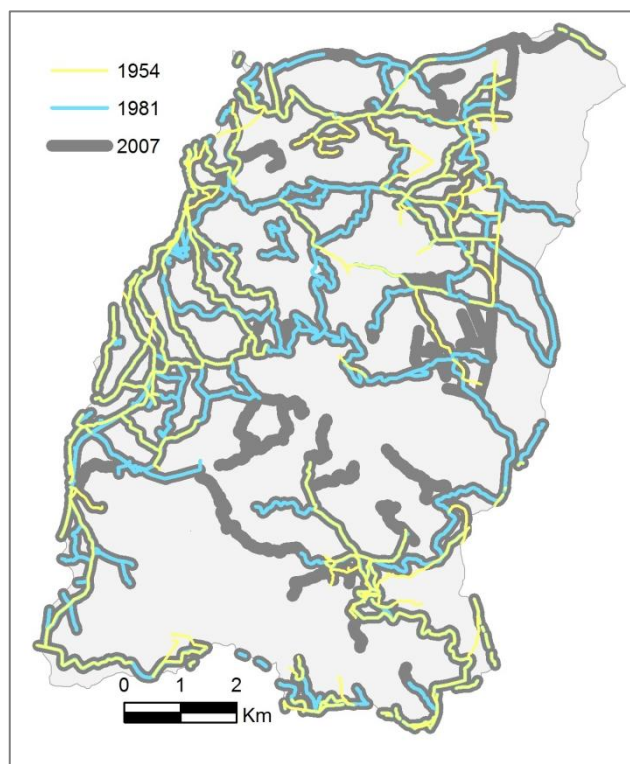


Figura 3.2-3 Mappa multi-temporale delle strade principali.

Dalla Figura 3.2-3 è possibile notare come i tratti stradali del '54 siano stati parzialmente ripresi e integrati col tempo, come si vede per l'anno 1981, e poi in maniera ancora maggiore per il 2007. Si nota inoltre che alcuni tratti presenti nel 1954 siano stati col tempo abbandonati. Per ogni anno preso in considerazione viene costruito mediante GIS un triplo *buffer* per le distanze pre-fissate. L'importanza della distanza dai tagli stradali per lo studio della franosità nell'area è principalmente legata alla instabilità derivata dalla variazione negli equilibri del versante dovuta alla presenza del taglio stradale.

Il *dataset* di fattori di partenza per le analisi è inoltre arricchito con le mappature multi-temporali della copertura del suolo per gli anni 1954, 1981, 2007 (vedi par. 3.2.2). Per gli stessi anni sono stati inoltre mappati i fenomeni franosi riconosciuti mediante foto-interpretazione, i cui dati e metodi verranno più largamente discussi nei successivi paragrafi (vedi par. 3.2.3).

3.2.2 Mappatura multi-temporale della copertura del suolo

Tenendo in considerazione uno degli scopi finale della ricerca del progetto di dottorato, ossia l'influenza dei cambiamenti di copertura del suolo sulla franosità, uno dei punti fondamentali è stata l'analisi dei cambiamenti di copertura del suolo in un intervallo di tempo di circa 60 anni.

L'evoluzione dei cambiamenti del LC deve essere definita tramite il confronto di almeno due informazioni temporali sull'uso o copertura del suolo riferite a periodi differenti (Pelorosso, 2008).

Per l'area di studio è stato preso in considerazione un intervallo di tempo di 53 anni (1954-2007) diviso in due periodi distinti. Il primo è compreso tra il 1954 e il 1981, mentre il secondo va dal 1981 al 2007. La scelta di queste date è dettata fondamentalmente dalla disponibilità dei materiali necessari all'analisi, quali fotogrammi aerei e ortofoto, e al fine di definire due intervalli temporali di lunghezza simile.

L'utilizzo delle analisi di immagini aeree è stato definito dopo un'attenta analisi bibliografica, tenendo in considerazione lo scopo finale della ricerca, il tempo e i fondi disponibili per l'acquisto dei materiali. Pelorosso et al. (2007) hanno dimostrato che l'unico modo per verificare la corretta evoluzione delle coperture del suolo è l'utilizzo di informazioni telerilevate (*Remote Sensing Derivated*, RSD); infatti gli autori, attraverso un confronto condotto a livello provinciale tra differenti fonti cartografiche e censuarie, hanno dimostrato che per gli ambienti naturali e semi-naturali (bosco, cespuglieti e pascoli) sussistono forti discordanze tra i dati esistenti, a causa delle differenti scale di mappatura e/o legati ai differenti scopi di utilizzo.

Inoltre, come sostenuto da Defries e Townshend (1999), per i periodi ante 1972, la foto aerea è l'unica fonte d'informazione RSD nel caso di analisi del cambiamento delle coperture delle terre, su ampia scala temporale.

Per i nostri fini, come si vedrà successivamente, le foto aeree utilizzate dovranno necessariamente passare attraverso un processo di orto-rettificazione e coregistrazione per definire una corretta evoluzione del territorio (Rocchini e Di Rita, 2005).

Al fine di investigare in maniera omogenea le dinamiche dei cambiamenti, si è dunque proceduto attraverso le seguenti fasi: 1- processamento di foto aeree; 2- costruzione mediante metodo omogeneo di mappe di copertura del suolo; 3- analisi dei cambiamenti di copertura del suolo e delle dinamiche di paesaggio attraverso l'utilizzo di indici parametrici.

3.2.2.1 Processamento di foto aeree

I materiali utilizzati per la produzione delle coperture del suolo per i vari anni analizzati (1954, 1981, 2007) sono stati i seguenti:

1. Modello digitale del terreno (DEM), con risoluzione di 5x5 m;
2. Foto Aeree di produzione Istituto Geografico Militare (IGMI) del 1954, 1981 e 2003, a scale variabili tra 1:34.000 e 1:31.000 circa e scansionate in formato TIFF ad una risoluzione di 800 Dpi (1 pixel = 1 metro) (Tabella 3.2-1);
3. Ortofoto digitali in formato ECW a colori della Regione Molise del 2007, con risoluzione del pixel 0,423 m (380162, 380163, 393071, 393072, 393073, 393074, 393083, 393081, 393084, 393031, 393032, 393033, 393041, 393042, 393043, 393044, 393124, 393111, 380152);
4. Carta Tecnica Regionale (CTR) alla scala 1:5000 (n. 39311, 39312, 39308, 39307, 39304, 39303, 38016, 38015).

Tabella 3.2-1 In tabella sono riportate le principali caratteristiche tecniche e l'identificativo (foglio, strisciata e numero) delle foto aeree utilizzate per le analisi a scala di bacino.

Anno	Periodo	Tipo	Scala	Quota volo (m)	Focale (cm)	Macchina da presa	Foglio	Numero strisciata (Id fotogrammia)
1954	Settembre 1954	Pancromatico	1:33.000/ 34000	6.000	153,01	Fairchild	154	74 (2913, 2914, 2915, 2916); 117 (3928, 3929, 3930, 3931); 118 (4167, 4168, 4169, 4170, 4171, 4172)
1981	Luglio 1981	Pancromatico	1:31000	5.400	152,55	Zeiss	154	11b (212, 213, 214, 215, 216, 217); 12 (93, 94, 95, 96, 97, 98)
2003	Giugno/Luglio 2003	Pancromatico	1:35.000/ 31000	4.700 - 5.300	152,82/1 53,31	Wild	154	5 (6485, 6486, 6487, 6488, 6489); 14 (717, 718, 719, 720, 721); 20 (757, 758, 759, 760, 761)

Come si può notare dall'elenco precedente, per l'anno 2007 sono state usate sia le ortofoto dello stesso anno che le foto aeree 2003; difatti, non essendo possibile utilizzare le ortofoto per un'adeguata mappatura dei fenomeni franosi (non è infatti possibile realizzare un modello stereoscopico da ortofoto già processate) sono state associate alle stesse le stereocoppie di foto aeree del 2003 reperibili sempre presso l'IGMI.

Le ortofoto 2007 sono state inoltre utili per la mappatura della copertura del suolo, essendo a colori e facilitando il riconoscimento delle classi. Inoltre la scelta dell'annata 2007 è legata alla necessità di creare due intervalli temporali (1954-1981 e 1981-2007) di durata circa omogenea.

In dettaglio, per ottenere l'ortorettifica delle foto aeree delle varie annate acquisite è stato utilizzato il software *Erdas Imagine*, attraverso il quale è necessario effettuare delle operazioni

metriche, utili per l'orientamento dei vari fotogrammi. Le fasi di orientamento si dividono essenzialmente in due parti:

- Orientamento interno, in cui si stabilisce come è posizionato il fotogramma rispetto alla camera al momento dello scatto, e che tiene conto delle eventuali deformazioni dell'immagine;
- Orientamento esterno, che è il processo per cui si determina la posizione della macchina rispetto all'oggetto fotografato nell'istante dello scatto e dunque in grado di ricostruire l'assetto della camera per ogni posizione di presa.

Per l'anno 1954 risalire ai parametri utili per effettuare le due fasi sopra descritte, risulta essere un processo laborioso e spesso non realizzabile. Difatti, per l'anno in questione, non è disponibile il certificato di calibrazione della macchina da presa dal quale si ricavano alcuni dati significativi come: la costante della camera, le coordinate dei punti fiduciali e del punto principale, e i parametri di distorsione radiale utili per correggere eventuali deformazioni. Le sole informazioni disponibili per questa annata sono in pratica la lunghezza focale nominale della macchina e la quota di volo, valori entrambi riportati sugli stessi fotogrammi.

Per le foto aeree del 1954, quindi, per quanto riguarda l'orientamento interno, le coordinate dei punti fiduciali e del punto principale sono state ottenute semplicemente calcolando le loro distanze attraverso software CAD, mentre non è stato in alcun modo possibile recuperare i parametri di distorsione radiale, e dunque non sono state applicate correzioni in tal senso.

L'operazione di orientamento esterno è stata condotta in tutte le annate di foto aeree a disposizione (1954, 1981, 2003), attraverso il metodo del vertice di piramide, utilizzando dei punti d'appoggio comuni individuati nelle foto aeree del volo 1954, del 1981, del 2003 e nelle ortofoto del 2007. I punti di appoggio (o *Ground Control Points*, GCP) sono punti del territorio presenti nel nostro caso nel 1954 e ancora riconoscibili sulle ortofoto del 2007, come ad esempio edifici e incroci stradali (Campbell, 1996; Pelorosso, 2008).

Nel nostro caso il reperimento di questi punti omologhi è stato molto laborioso e ha richiesto un notevole dispendio di tempo. Ciò è essenzialmente dovuto alla scarsa qualità delle immagini delle foto aeree che sono sfocate lungo i bordi e al fatto che essendo le immagini del 1954 siamo bianco e nero compromettendo di fatto la facile distinzione degli oggetti. Infine ai punti precedenti va aggiunto che, essendo le zone analizzate tipicamente collinari e di impronta rurale, le stesse sono caratterizzate da scarsa urbanizzazione e quindi la reperibilità di punti attraverso l'utilizzo di soli manufatti risulta difficoltosa, specie dove la vegetazione è abbondante.

Al fine di ottenere una buona risoluzione, per ogni singolo fotogramma di ogni strisciata sono stati individuati in media 12 GCP, 20 punti di connessione (*Tie Points*) e 3 punti di controllo

(*Check Points*); questi ultimi sono stati utilizzati per determinare l'accuratezza di posizionamento dei GCP. La definizione delle coordinate X, Y e Z dei GCP è stata eseguita mediante le ortofoto 2007 e il DEM 5x5 m, riferiti al sistema di proiezioni Gauss Boaga Datum Roma 40, con un errore sistematico non eccedente i 3 m.

Infine, attraverso il processo di triangolazione aerea sono stati calcolati gli altri parametri che erano inizialmente sconosciuti nel modello. La tecnica usata per la triangolazione è quella del "*bundle block adjustment*", in grado di elaborare i fotogrammi di ogni strisciata come unico blocco e di stabilire le varie geometrie di presa tra le varie coppie fotogrammetriche, la macchina da presa e il terreno.

Durante il processo di modellazione, inoltre, sono stati compensati gli inevitabili errori di tipo lineare e non lineare dovuti a cause fisiche sulle lenti, a errori nella scansione del fotogramma, alla rifrazione dell'atmosfera, ecc., attraverso l'utilizzo del modello fisico di D.C. Brown a 14 parametri incognite (Brown, 1976).

Una volta effettuata la calibrazione delle immagini, è stato possibile eseguire l'ortorettifica dei fotogrammi usando come superficie di elevazione di riferimento il DEM 5x5 m derivato e, come algoritmo di ricampionamento, la funzione *nearest neighbour* e una risoluzione del pixel di 1 m. Tutte le ortofoto ottenute per le singole foto aeree sono state unite in un unico mosaico mediante il *mosaic tool* di ERDAS Imagine, seguendo linee note presenti nelle foto come strade, fiumi o altri elementi territoriali al fine di sfumare le eventuali zone di unione.

Per le foto aeree riferibili al 1981 e al 2003, avendo a disposizione i certificati di calibrazione, si è proceduto solo con la fase di orientamento esterno con successiva ortorettifica e mosaicatura delle varie foto aeree, rendendo il processo molto più speditivo rispetto a quelle relative al 1954. Le varie fasi di processamento delle foto aeree e il loro utilizzo sono riportate in Figura 3.2-4.

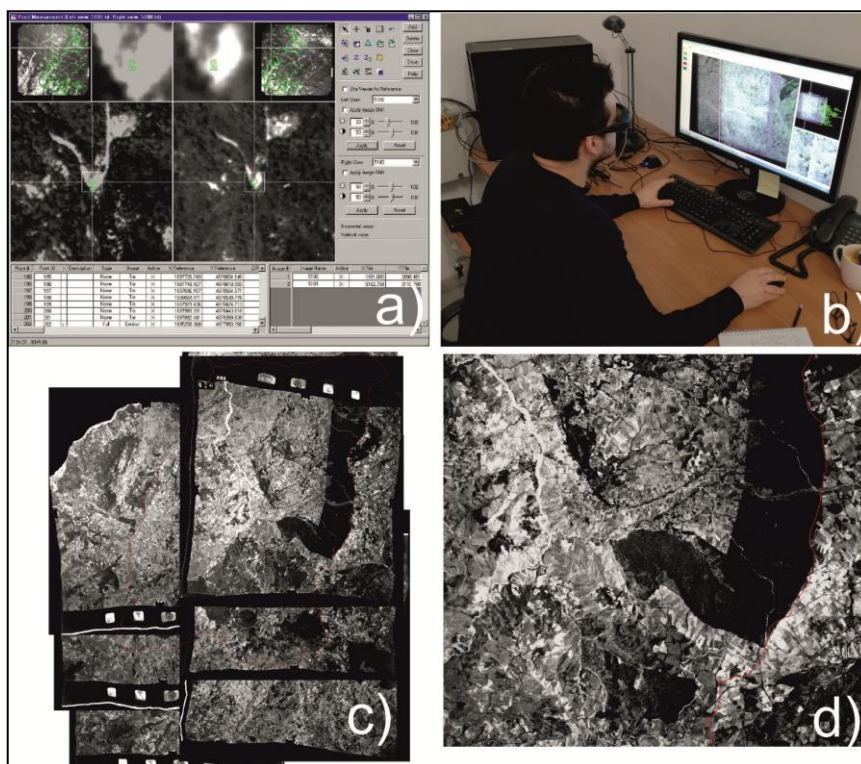


Figura 3.2-4 Sintesi dei principali passaggi del processamento delle foto aeree. a) Fase di selezione dei punti di appoggio comune per l'orientamento dei fotogrammi; b) Analisi digitale delle stereocoppie per la mappatura dei fenomeni franosi (vedi par. 3.2.4); c) Creazione delle singole ortofoto; d) Ortomosaico costruito dalle singole ortofoto attraverso il mosaic tool di ERDAS image

3.2.2.2 Costruzione omogenea di mappe di copertura del suolo

La digitalizzazione delle carte di LC per le varie annate è stata creata in ambiente GIS utilizzando una scala di mappatura costante (1:5000). Si è scelto inoltre di utilizzare una Minima unità di Mappa (MUM), con cella pari a 20x20 m. La griglia è usata per facilitare il lavoro del fotointerprete, e ogni cella ha una estensione pari a 400 m² per consentire di valutare l'opportunità di cartografare o meno ogni elemento. La classificazione del tipo di copertura del suolo all'interno della griglia è stata effettuata sulla base della copertura che caratterizza per almeno il 50% la MUM; ciascuna cella è stata quindi analizzata singolarmente e classificata secondo la copertura del suolo prevalente.

Al fine di ottenere una buona mappatura del LC per le varie annate, si è scelto di analizzare gli ortomosaici precedentemente creati dai fotogrammi prescelti (vedi paragrafo precedente) (Figura 3.2-5).

Una delle fasi cruciali nel lavoro di mappatura consiste nella valutazione delle tipologie di copertura del suolo da rilevare. In tale analisi si è deciso di procedere identificando un numero di classi che rappresentino un giusto compromesso tra praticità e veridicità, tenendo in considerazione i seguenti punti:

- diverso comportamento rispetto alla propensione alla franosità;

- classi utilizzate in lavori simili, già pubblicati;
- livello di dettaglio sufficiente rispetto alla scala ed all'area analizzata;
- consentano di distinguere poligoni di classi di LC sufficientemente dettagliati per la caratterizzazione delle aree di innesco da frane.

Dall'analisi dei punti precedentemente descritti si è deciso di rilevare e distinguere le seguenti tipologie: aree urbane, aree a coltivo, foreste, pascoli, cespuglieti, zone umide e aree denudate. In dettaglio, nella classe foresta sono associati tutti i tipi di boschi e rimboschimenti; nelle zone umide rientrano anche le aree di alveo dei fiumi con superficie minima cartografabile, mentre nelle aree a coltivo rientrano i seminativi e i frutteti. Nella classe dei cespuglieti rientrano cespugli, arbusti e piante erbacee, e nei pascoli rientrano le praterie naturali non sottoposte a lavorazioni, dunque soggette solo al pascolo, i pascoli e i terreni caratterizzati da vegetazione erbacea legata strettamente all'abbandono dell'attività agricola (incolti).

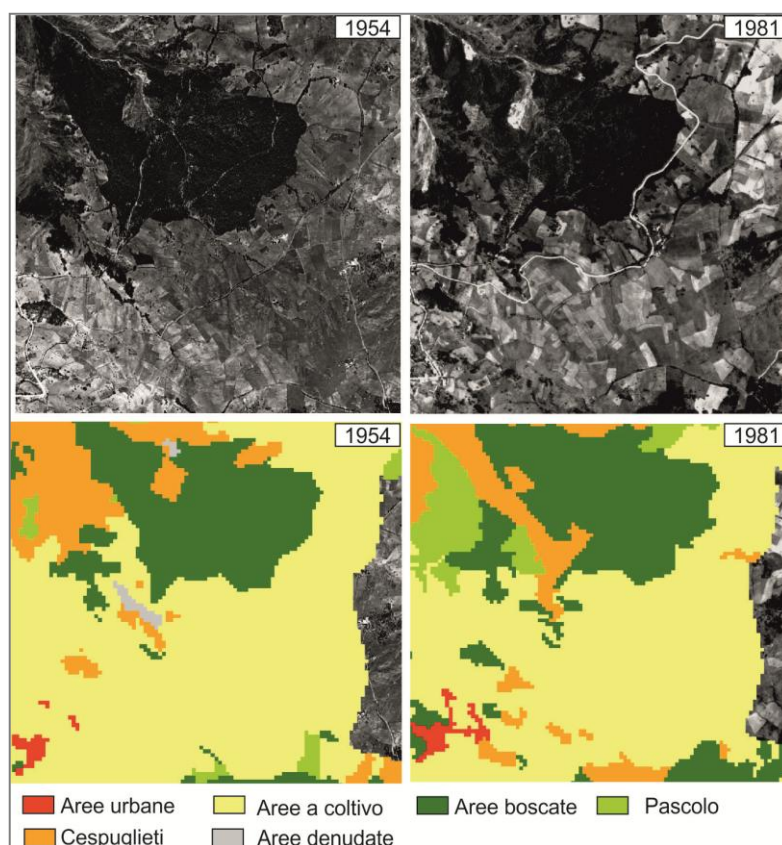


Figura 3.2-5 Esempio di mappatura di copertura del suolo all'interno del bacino del T. Rivo. In alto sono riportati degli stralci di ortofoto ottenute per il 1954 e 1981, mentre in basso sono riportate le relative coperture del suolo ottenute.

La classificazione utilizzata rispecchia parzialmente quella presentata nel “Sistema di classificazione delle terre IUTI (Inventario Uso delle Terre Italiano)” che, come descritto in Marchetti et al. (2012), ha dato risultati molto affidabili per l’inventario dei cambiamenti di copertura e uso del suolo avvenuti tra il 1990 e il 2008 sul territorio nazionale. Tale

classificazione, tuttavia, incorpora nella categoria denominata *other land* aree denudate e aree a cespuglieto, che nel presente studio vengono invece considerate in due classi differenti.

Bisogna precisare inoltre che le 7 classi qui distinte sono simili a quelle utilizzate in lavori analoghi che analizzano la variazione di franosità in relazione alla copertura del suolo. (Promper et al., 2014; Reichenbach et al., 2014).

3.2.2.3 Analisi dei cambiamenti di copertura del suolo e delle dinamiche di paesaggio attraverso l'utilizzo di indici parametrici

I cambiamenti di uso del suolo nelle varie annate sono stati quantificati sia attraverso l'analisi dei trend generali dell'effettiva variazione di superficie occupata da ogni singola classe di uso del suolo e sia mediante l'utilizzo più complessi metodi parametrici noti in letteratura.

Difatti per la rilevazione dei cambiamenti tra le varie annate sono state realizzate e analizzate alcune matrici di transizione, utilizzando il *tool crosstab* del programma Gis IDRISI.

Le matrici di transizione sono utilizzate in letteratura per la quantificazione delle variazioni dinamiche tra le popolazioni e hanno largo uso negli studi di carattere ecologico (Bracchetti et al., 2012; Liu e Taylor, 2002; Rocchini et al., 2006; Flamenco-Sandoval et al., 2007; Monteiro et al., 2011; Pelorosso et al., 2011).

Attraverso le matrici di transizione vengono conteggiati i singoli flussi da una copertura x ad una copertura y, distintamente dagli altri flussi che coinvolgono le stesse coperture x e y (ad esempio da y a x, oppure da x a z, ecc.). Il metodo si basa sull'utilizzo della matrice di transizione (Figura 3.2-6), ossia di una tabella in cui si riporta l'estensione delle superfici (in ettari, metri², numero di pixel, ecc.) per ogni uso del suolo in due istanti temporali (T0 e Tn): sulle righe della matrice verranno quindi riportati i flussi di ingresso, ossia le coperture presenti al tempo iniziale (T0), mentre sulle colonne saranno riportate quelle presenti al tempo finale (Tn).

	Time Tn			
	Classe x	Classe Y	Classe Z	Classe N
Time T0				
Classe x	P_{xx}	P_{xy}	P_{xz}	P_{xn}
Classe Y	P_{yx}	P_{yy}	P_{yz}	P_{zn}
Classe Z	P_{zx}	P_{zy}	P_{zz}	P_{nz}
Classe N	P_{nx}	P_{ny}	P_{nz}	P_{nn}

Figura 3.2-6 Esempio di matrice di transizione con quattro categorie di uso del suolo.

La matrice di transizione consente di valutare in maniera accurata le trasformazioni o la persistenza di ogni classe di copertura del suolo attraverso la conoscenza della copertura di

partenza e quella di destinazione. Le stesse variazioni espresse in termini probabilistici corrispondono a delle catene di Markov di primo ordine.

Le matrici di transizione sono molto utilizzate in letteratura sia per l'analisi dei cambiamenti dinamici passati che per la costruzione di possibili scenari futuri di cambiamento (Flamenco-Sandoval et al., 2007; Munsu et al., 2010; Tattoni et al., 2011), assumendo naturalmente che i processi di cambiamento siano stazionari nel tempo. Inoltre sempre attraverso il *crosstab tool* di Idrisi è stato possibile valutare l'indice di permanenza Kappa (K), il quale permette di quantificare quanto sono stabili le differenti classi di uso/copertura del suolo nel periodo di analisi (Romero-Calcerrada e Perry, 2004; Rocchini et al., 2006). Se la distribuzione di una classe rimane la stessa nei due intervalli di tempo, allora l'indice sarà 1; al contrario, esso sarà pari a 0.

3.2.3 Metodo utilizzato per la modellizzazione di scenari futuri di copertura del suolo

Nell'ambito dello studio multi-temporale della franosità, al fine di valutare anche i possibili cambiamenti futuri di copertura del suolo che ne determinerebbero variazioni, sono stati ipotizzati alcuni scenari di copertura del suolo per l'anno 2030 e 2050. La creazione di questi scenari futuri è stata possibile grazie alla collaborazione con il Dr. Ziga Malek della Vrije Universiteit di Amsterdam (Paesi Bassi).

Nel dettaglio, è stato creato un modello spaziale mediante il software Dinamica EGO, una piattaforma GIS basata sull'utilizzo di mappe *raster* (Soares Filho et al., 2002). Dinamica EGO è una piattaforma sviluppata dall'Università Federale di Minas Gerais in Brasile, ed è un *freeware* liberamente scaricabile dal sito: <http://csr.ufmg.br/dinamica/downloads/>. Il *software* modella le transizioni da uno stato x ad uno stato y ($x \rightarrow y$), considerando la mappa di probabilità di cambio di uso del suolo, calcolata mediante la *Weight of Evidence*, che guida l'automa cellulare durante la simulazione di allocazione spaziale.

Tale approccio è stato ampiamente applicato per la modellizzazione urbana nell'espansione dell'agricoltura e per le variazioni dinamiche delle foreste (Almeida, 2003, Maeda et al., 2011; Kamusoko et al., 2013; Malek et al., 2015).

Il metodo per l'ottenimento dei modelli è diviso in due parti: la locazione spaziale di copertura del suolo nello scenario, e la domanda non-spaziale di quantità di copertura del suolo. È stato innanzitutto tarato il modello spaziale mediante un'analisi dei *drivers* dei cambiamenti passati. Usando poi il modello bayesiano della *Weight of Evidence*, è stata analizzata la significatività dei seguenti fattori: distanza dai centri abitati, distanza dai tagli stradali, altitudine,

inclinazione del pendio, orientazione (esposizione) e curvatura del pendio. Successivamente, mediante automi cellulari è stato applicato un algoritmo di allocazione spaziale e calibrato sulla base dei cambiamenti a lungo termine osservati (1954-2007).

Gli automi cellulari sono integrati nel software Dinamica EGO, e utilizzati per riprodurre le dinamiche del paesaggio e la maniera in cui i pattern evolvono. Il paesaggio è dunque rappresentato da un vettore n-dimensionale di un certo numero di cellule presenti in un dato raggio di vicinanza che interagiscono tra di loro. Lo stato di ogni cellula è funzione sia dello stato precedente dei pixel all'interno del vicinaggio che di una serie di regole di transizione. Per questo motivo sono spesso usati nello studio dei cambiamenti di copertura di suolo a scala di dettaglio, in quanto riescono a simulare i meccanismi determinati da processi decisionali. Per esempio, secondo questo metodo, l'espansione urbana è più probabile che avvenga in futuro in prossimità degli insediamenti esistenti. Il modello è stato calibrato con la metrica del paesaggio e i cambiamenti di copertura del suolo osservati, ossia la dimensione media delle aree nella nuova area urbana, della foresta e delle zone a coltivo. In questo modo è stato possibile individuare un pattern spaziale realistico dei potenziali cambiamenti futuri.

La seconda parte del metodo, ossia la domanda non spaziale di copertura del suolo negli scenari, è basata anch'essa sui cambiamenti osservati, ma con minori modifiche. L'area boscata, le praterie, i cespuglieti e le zone urbane seguono tutte i trend passati, mentre le aree denudate vengono considerate stabili. Inoltre, nonostante ci sia un incremento della zona a coltivo tra il 1954 e il 2007, al modello è stato concesso di diminuire le zone a coltivo per il 2030. Ciò è dovuto alla recente e continua espansione delle zone boscate che hanno rappresentato il processo più significativo in termini di estensione spaziale. Le foreste, per di più, sono state modellate come espandibili anche a spese delle aree coltivate. Seguendo questo trend sono stati impostati due scenari futuri per il 2050 (2050a e 2050b), uno che segue linearmente il trend del 2030, ed un altro che invece prende in considerazione una estrema diminuzione della foresta e delle aree a coltivo. Quest'ultimo scenario tiene in considerazione quanto riportato nel report dell'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (Kovats et al., 2014), il quale sostiene che a causa dell'aumento delle temperature e del regime pluviometrico, che saranno più intensi e brevi per il 2050, vi sarà una disponibilità di risorse per l'attività agricola minore di quella attuale (Trnka et al., 2010, 2011; Ciscar et al., 2011). Dallo stesso rapporto si evince che, a causa dell'aumento dei periodi asciutti con temperature più elevate, si potrà avere una probabilità di frequenza di incendi maggiore. Ciò si traduce in un aumento della desertificazione e quindi delle aree post-coltivo e post-incendio (nascita di pascoli, cespuglieti e denudati).

La domanda non spaziale dei tipi di uso del suolo è stata estrapolata dai trend passati, per cui sono state analizzate le potenziali conseguenze della continuazione dei processi di cambiamento

già osservati. Tutti i cambiamenti di uso del suolo futuro sono stati interpolati con l'annata dell'ultima mappatura realizzata (2007), e gli stessi sono stati poi valutati attraverso le matrici di transizione.

Gli scenari ottenuti sono stati poi utilizzati come input per ottenere delle mappe di suscettibilità futura in funzione dei cambiamenti appena modellati. Per validare la bontà della simulazione dei processi osservati, sono stati calcolati diversi parametri metrici. E' stato simulato il LC per il 2007 usando come riferimento la mappa del 1981, e sono stati osservati i trend dei cambiamenti avvenuti. Successivamente sono state confrontate la mappa reale 2007 con quella simulata, e sono stati quindi calcolati parametri quali: *Kappa simulation*, *Kappa transition* e *Kappa transloc*. Il *Kappa simulation* che varia in un intervallo tra -1 e 1, è il coefficiente di concordanza tra la mappa simulata e la mappa reale, tenendo in considerazione i cambiamenti e la persistenza (van Vliet et al., 2011). Il *Kappa transition* (range tra 0 e 1) descrive la concordanza tra la quantità dei cambiamenti di copertura del suolo, mentre *Kappa transloc* (range tra -1 e 1) rappresenta l'accordo nell'allocazione dei cambiamenti (van Vliet et al., 2011).

3.2.4 Mappatura multi-temporale dei fenomeni franosi

Sono state create diverse mappe multi-temporali degli eventi franosi partendo dai diversi set di foto aeree a disposizione. Levate fotogrammetriche rappresentanti situazioni temporali diverse per la stessa area consentono di indagare l'evoluzione dei fenomeni franosi, temporalmente e spazialmente (Guzzetti et al., 2005; Fiorucci et al., 2011), dando importanti informazioni in merito ai processi di erosione e di evoluzione del paesaggio (Guzzetti et al., 2009; Larsen et al., 2010). Nell'ambito di questo progetto di ricerca, sono stati valutati i cambiamenti avvenuti nel tempo nel territorio del bacino del Rivo ad opera dei fenomeni di instabilità di versante.

Gli inventari dei fenomeni franosi possono essere preparati usando differenti tecniche (Guzzetti et al., 2006a, 2012) e possono fornire informazioni fondamentali per costruire statistiche affidabili sulle dimensioni delle frane e sulle loro aree di distacco (Guzzetti et al., 2002; Malamud et al., 2004b). La selezione di una specifica tecnica di mappatura è dipendente dallo scopo dell'inventario, dall'estensione dell'area, dalla scala di mappatura, dalle risoluzioni e dalle qualità delle immagini da investigare, nonché dall'abilità e dall'esperienza del fotointerprete (Guzzetti et al., 2012). Per quel che riguarda l'ultimo punto difatti, molti autori evidenziano come la delimitazione e il riconoscimento dei fenomeni franosi possono variare al variare dei fotointerpreti o degli esperti che conducono il lavoro (Carrara et al., 1992; Wills e McCrink, 2002), creando una soggettività interpretativa che può determinare risultati diversi in termini di indici di franosità, anche nell'ambito della stessa area (Fookes et al., 1991; van Westen et al.,

1999; Parise, 2003). Parise (2003) al fine di superare il problema riguardante l'omogeneità e l'uniformità nella fase interpretativa, consiglia, laddove possibile, l'utilizzo dello stesso fotointerprete.

Data la precedente premessa in relazione all'obiettivo finale della ricerca, si è dunque scelto di realizzare una mappatura dei fenomeni franosi, non tenendo in considerazione le mappature ufficiali presenti nell'area (vedi IFFI), in quanto dalle informazioni riportate in tali *dataset* non è possibile riconoscere differenti stati di attività dei fenomeni franosi nei vari intervalli di tempo analizzati. L'inventario IFFI infatti, fornisce informazioni solo in merito al periodo di rilevamento effettuato, e risulta impossibile risalire a stadi di attività attribuibili a precedenti intervalli di tempo. Tale informazione risulta importante per il presente studio, in quanto attivazioni e stati di attività attribuibili a diverse condizioni di propensione al dissesto (tra cui la copertura del suolo) che possono aver caratterizzato il grado di stabilità dei versanti, sono fondamentali.

I set di foto aeree analizzati sono i medesimi di quelli utilizzati per la mappatura multi-temporale della copertura del suolo, precedentemente descritti nel paragrafo 3.2.2; come già descritto, successivamente al processo fotogrammetrico, le stereocopie sono state analizzate mediante visualizzatore stereografico digitale, attraverso l'uso del *tool Stereo Analyst* del pacchetto Erdas Imagine (2015). L'utilizzo della visione stereoscopica permette infatti di ottenere un'alta qualità nella visione tridimensionale del terreno, di fondamentale importanza per l'identificazione di segni morfologici distintivi dei fenomeni franosi occorsi (Rib e Liang, 1978; van Zuidam, 1985; Fiorucci et al., 2011). La visione stereoscopica abbinata alla possibilità di riportare gli oggetti mappati immediatamente in digitale, permette l'acquisizione di informazioni da immagini stereoscopiche che possono essere integrate direttamente in ambiente GIS, riducendo i tempi di acquisizione e gli errori associati alla digitalizzazione manuale tradizionale (Ardizzone et al., 2013).

I fenomeni franosi sono stati censiti e descritti basandosi sulla classificazione proposta da Cruden e Varnes (1996), e distinguendo le seguenti classi di tipologia di movimento: (i) scivolamenti (rotazionali o traslativi), (ii) fenomeni complessi o compositi, (iii) colate. Le frane prese in considerazione sono quelle ritenute verosimilmente superficiali che coinvolgono i primi metri di terreno e che si sviluppano generalmente all'interno dei perimetri di fenomeni più ampi e antichi.

Per i vari perimetri di frana mappati sono state distinte la zona di distacco e la zona di accumulo (Figura 3.2-7 e Figura 3.2-8).

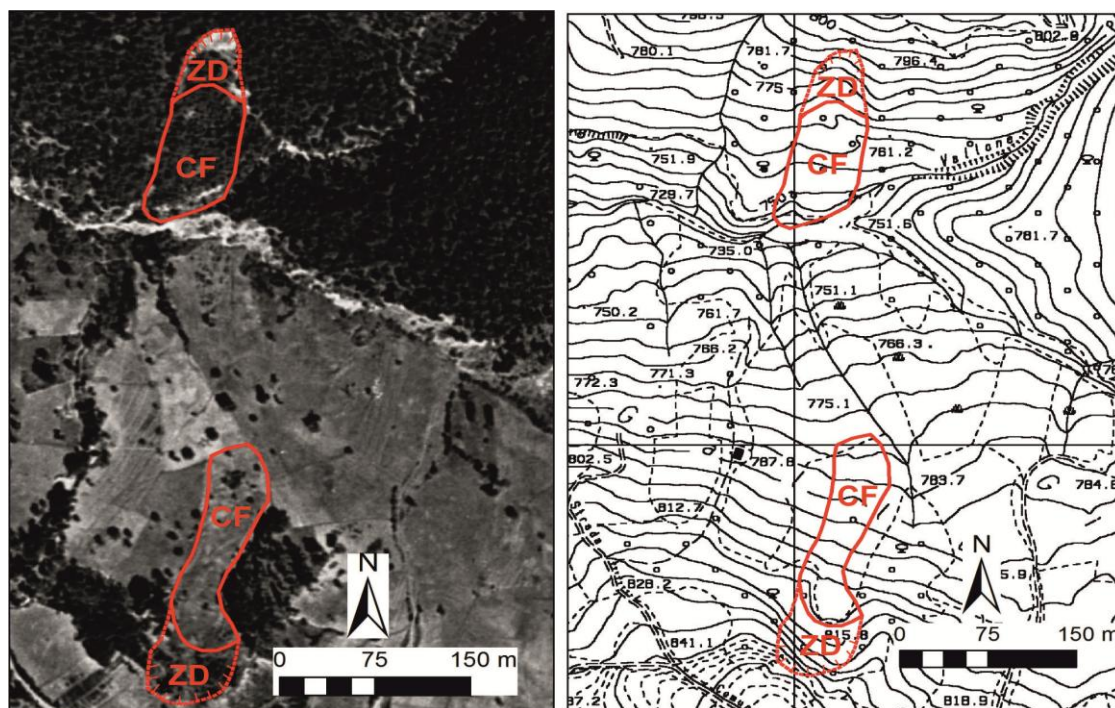


Figura 3.2-7 A sinistra due fenomeni franosi riportati su ortofoto relativa al 1954, in cui vengono distinte le zone di distacco (aree di innesco) (ZD) e le zone di accumulo (CF). A destra le stesse frane sono riportate e ancora riconoscibili su base topografica 1:5000 della carta CTR.

Questa distinzione è stata necessaria poiché le sole zone di distacco vengono tenute in considerazione durante la fase di modellizzazione della suscettibilità da frana, dato che le stesse sono strettamente correlate al meccanismo di distacco e quindi di origine del fenomeno franoso (Fernandez et al., 2003; Conforti et al., 2012, 2014). Inoltre, come dimostrato da Regmi et al. (2014), l'accuratezza dei modelli di suscettibilità è migliore quando essi sono basati su campioni ottenuti dalle aree di distacco, ipotizzando che la maggior parte delle frane mappate per l'area di studio si siano verificate a causa della sfavorevole condizione di pendenza nelle aree di coronamento.

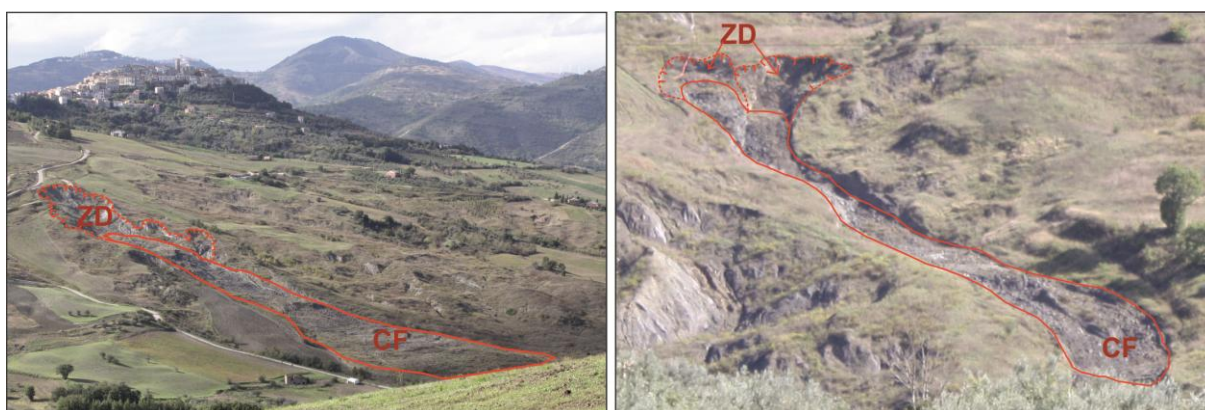


Figura 3.2-8 Nelle foto sono riportanti due tipici fenomeni franosi alimentate da più aree sorgente, ricadenti nel bacino del Rivo (precisamente a valle dell'abitato di Trivento) attivi e risalenti all'autunno 2016. Dalla foto sono facilmente distinguibili le zone di distacco (ZD) e le zone di accumulo (CF).

Per quel che riguarda l'età di innesco o lo stato di attività, in relazione allo scopo della ricerca sono state riconosciute nelle varie annate solo le frane caratterizzate da evidenze di movimenti recenti con chiare zone di scarpata e deposizione, e con chiari segni di cambiamenti nel pattern di vegetazione lungo i bordi del corpo di frana. Queste infatti possono essere definite recenti, e si ritiene abbiano subito con ogni probabilità un movimento negli anni immediatamente precedenti all'annata della foto aerea analizzata. Ciò ha lo scopo di captare, con la massima accuratezza possibile, le sole frane che si siano sviluppate nel periodo più prossimo all'annata della foto aerea analizzata e quindi con ogni probabilità riferibile alla copertura del suolo caratterizzante quel periodo.

Da attività di campo, e come riportato in uno studio effettuato su un'area appenninica limitrofa a quella qui investigata (Wasowski et al., 2010), movimenti di massa superficiali hanno un periodo di vita molto breve, al contrario di quelli più ampi e più profondi che invece lasciano segni molto più persistenti sul paesaggio.

È stato deciso dunque di partire dal set di foto più antico (1954), e di creare una prima mappatura e digitalizzazione dei fenomeni franosi, andando a discretizzare quali di essi presentassero uno stato di attività "recente", e quali invece uno stato di attività più antico e quindi riferibili a decenni precedenti, e che dunque non potevano essere con certezza correlati alla copertura di uso del suolo dell'istante analizzato. Seguendo la stessa procedura anche per i set di foto aeree e ortofoto delle annate successive, le frane riconosciute come nuove o di recente attività, sono state segnalate e catalogate in differenti *database* GIS, differenziando il tipo di movimento.

3.2.5 Metodo utilizzato per l'analisi multi-temporale della suscettibilità da frana

Nell'ambito dell'analisi multi-temporale della propensione al dissesto dell'area del bacino del Rivo, è stato utilizzato il metodo semi-quantitativo per l'applicazione alla suscettibilità da frana, lo *Spatial Multi-Criteria Evaluation* (SMCE).

L'applicazione si basa su una valutazione spaziale "multi-criterio", su un modello semi-quantitativo implementato nel software GIS ILWIS, sviluppato da ITC (2007), disponibile liberamente in diverse versioni rilasciate; per questa applicazione è stata utilizzata la versione 3.3 *Academic*.

L'approccio SMCE si basa sulla valutazione di variabili spaziali mediante diversi indici basati su criteri proposti dallo strumento GIS, che vengono poi standardizzati in valori compresi tra 0 e 1. La struttura concettuale consiste in uno schema ad albero definito "*criteria tree*", che

definisce il problema e che ha come radice lo scopo finale definito dall'utente (in questa applicazione rappresentata dalla mappa di suscettibilità da frana), mentre i rami rappresentano i sotto-obiettivi o le alternative, e i criteri sono spazialmente definiti da mappe (in questo caso essi sono rappresentati dai fattori predisponenti). Il risultato finale è una mappa che viene ottenuta sommando le prestazioni di tutti i valori delle celle dei diversi criteri per la particolare alternativa (Castellanos Abella e van Westen, 2007) standardizzata con valori tra 0 e 1.

La scelta di questo approccio, in alternativa ad uno statistico *data-based*, è stata guidata dall'interesse di acquisire delle mappe finali ottenute con un approccio metodologico che non si basasse solo sull'occorrenza degli eventi precedenti (frane mappate pre-esistenti), appunto *data-based*. La ragione risiede nel voler applicare un metodo omogeneo per l'analisi della predisposizione da frana per il passato e per gli scenari costruiti per il 2030 e 2050, considerando la ovvia impossibilità di ottenere un database di frane occorse per gli scenari futuri (2030, 2050a,b). Un altro vantaggio di questo metodo è rappresentato dal fatto che l'esperto svolge un ruolo chiave nella procedura di ponderazione, e i pesi delle variabili possono essere mantenuti costanti in ogni *performance*.

In questa applicazione sono stati utilizzati sette fattori predisponenti sottoforma di mappe raster (Figura 3.2-9).

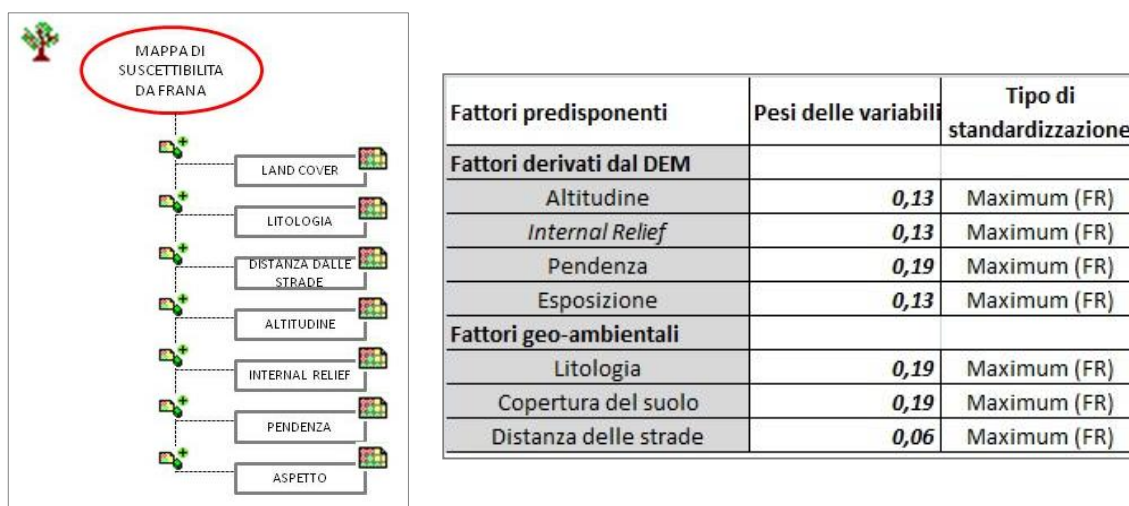


Figura 3.2-9 Schema semplificato del “criteria tree” utilizzato per l'esecuzione della SMCE.

Le condizioni geomorfologiche dell'area di studio sono rappresentate dalle mappe di pendenza, di energia del rilievo (*internal relief*), esposizione del pendio (orientazione rispetto al Nord) e altitudine. Tali fattori sono stati derivati come descritto nel paragrafo 3.2.1. I fattori morfologici vengono affiancati dalla mappa litologica; la distanza dai tagli stradali principali identificata attraverso 4 livelli (50, 100, 150 e >150 m) e la copertura del suolo ottenuta mediante mappatura come spiegato nel paragrafo 3.2.2, suddivisa in sette classi: urbano, terreni coltivati,

foreste, praterie, zone umide, cespuglieti, e zone denudate (modificato sulla base di IPCC-GPG-LULUCF, classificazione riportata in Marchetti et al., 2012). La distanza dai tratti stradali, al pari dell'uso del suolo, è stata mappata per diversi momenti temporali del passato: 1954, 1981, 2007; per la copertura del suolo sono state elaborate in aggiunta anche delle mappe-scenario per il 2030 e 2050 (a, b) (vedi par. 3.2.4).

L'analisi mediante SMCE è stata effettuata per ogni anno selezionato ed i fattori sono stati standardizzati con il metodo di classificazione diretta proposta dal software, mentre i pesi delle classi dei fattori sono stati espressi utilizzando i valori di *frequency ratio* FR standardizzati con la funzione di standardizzazione lineare massima (ITC, 2001). I valori dei pesi e la metodologia di standardizzazione sono schematizzati nella tabella (Figura 3.2-9), dalla quale si evince come si sia preferito dare sulla base del giudizio esperto, un peso più elevato ai fattori litologia, copertura del suolo e pendenza, mentre valori più bassi sono stati attribuiti agli altri fattori derivati dal DEM ed in ultimo alla distanza dalle strade.

Al fine di determinare in maniera quantitativa i valori dei pesi delle classi di ogni fattore, basandosi sul principio che le frane occorrono seguendo meccanismi che ne hanno determinato l'occorrenza in passato, sono stati determinati mediante la *Frequency Ratio* (FR) (Lee e Talib, 2005; Lee e Pradhan, 2007; Pradhan e Lee, 2009; Yalcin et al., 2011). La FR è il rapporto tra l'area affetta da frane nell'area totale dello studio, ed il rapporto tra la probabilità di occorrenza di un evento di frana in una data classe. Valori maggiori di 1 indicano che la frequenza di frana nella classe è più alta della frequenza nell'intera area, mentre se il valore è più basso la frequenza delle frane nella categoria è più bassa rispetto a quella dell'intera mappa (Regmi et al., 2010). Dunque valori maggiori di FR indicano una maggiore propensione al dissesto di quella particolare categoria.

In pratica essa viene calcolata in ogni classe operata sugli anni 1954, 1981, 2007, mediante la formula:

$$\text{Equazione 3.2-1} \quad FR = \frac{(AF_C/AF_{tot})}{(AT_C/AT_S)}$$

dove AF_C rappresenta l'area affetta da frana, calcolata considerando l'area di scarpata di frana, nella classe del *layer* esaminato; AF_{tot} rappresenta l'area totale affetta da frana nell'area di studio; AT_C è l'area totale della classe, ed infine AT_S è l'area totale del caso di studio. Questo calcolo è stato utile per standardizzare l'influenza delle frane in ogni classe di ogni variabile, determinare una media delle FR tra le diverse annate ed applicare tale valore medio come costante a tutte le mappe, tranne per la distanza dai tagli stradali e per le coperture del suolo, per le quali sono state utilizzate le FR calcolate per l'anno corrispondente. Infine negli scenari per la copertura del suolo è stata considerata la proiezione matematica lineare dei valori di FR.

Per convalidare le mappe di suscettibilità create, è stato utilizzato il metodo dell'area sottesa dalla curva ROC (vedi par. 3.1.2). Per la creazione della curva ROC come spiegato in precedenza per gli altri metodi, è necessario avere un dataset di validazione non utilizzato per la costruzione del modello, ed i metodi per l'individuazione di un campione di punti indipendente possono essere molteplici (Pourghasemi et al., 2014 e relativa bibliografia). A tal proposito per la mappa di suscettibilità relativa al 1954 sono stati utilizzati come dataset di validazione i punti centroidi estratti dalle zone di distacco dell'anno 1981, mentre per quella del 1981 sono stati utilizzati i punti relativi al 2007. Per la mappa di suscettibilità riguardante il 2007 il 10% delle zone di distacco (campionate ciascuna con tre punti random), appositamente escluse dalla costruzione del modello, sono state poi utilizzate per la validazione. Le mappe di suscettibilità ottenute sono state confrontate tra loro, al fine di valutare l'entità di variazione percentuale tra le singole classi di suscettibilità. Inoltre, una volta valutati spazialmente i cambiamenti si è creato un *overlay* con le mappe di cambiamento di copertura del suolo tra un'annata e quella ad essa precedente, al fine di valutare quali cambiamenti di copertura del suolo abbiano influenzato le variazioni di suscettibilità.

3.2.6 Metodo e dati utilizzati per la stima del danno agricolo indotto da frane

L'importanza della stima dei danni agricoli derivanti da fenomeni franosi è legata al fatto che in Molise circa il 60% dei fenomeni franosi censiti a livello regionale (IFFI, 2007) ricade in terreni agricoli, il 32% in terreni boschivi, mentre solo lo 0,2% in aree urbanizzate (Aucelli et al., 2008). Il danno agricolo non può essere solo stimato per le frane esistenti, ma deve essere caratterizzato anche per la propensione che un terreno può avere al dissesto da frana.

Si presentano dunque qui i dati necessari ed il metodo utilizzato per stimare tali valutazioni.

Per quanto riguarda i fenomeni franosi, il *dataset* utile per le analisi del danno economico agricolo nell'area del Bacino del Rivo è stato estratto dall'inventario IFFI (Roskopf e Aucelli, 2007).

Infatti, considerata la natura dell'analisi inerente la possibile perdita economica, si è preferito utilizzare l'inventario IFFI e non il database multi-temporale presentato in precedenza, essenzialmente poiché l'IFFI è riconosciuto come dato ufficiale, oltre ad essere differenziato in base allo stato di attività dei fenomeni franosi, parametro fondamentale per il metodo qui utilizzato.

La copertura del suolo è stata estratta dalla mappa fornita dal progetto *Corine Land Cover* 2006, mentre per quanto concerne il danno economico agricolo, sono stati reperiti i dati inerenti

il Valore Agricolo Medio (VAM) dalla banca dati dell'Agenzia dell'Entrate (fonte: <http://www.agenziaentrate.gov.it/wps/content/nsilib/nsi/documentazione/omi/banche+dati/valori+agricoli+medi>).

Al fine di stabilire la propensione al dissesto da frana su tutta l'area è stata realizzata una carta di suscettibilità seguendo il metodo della *Weight of Evidence* già precedentemente usato per l'analisi di suscettibilità a scala regionale.

Per la realizzazione della *Weight of evidence* le variabili indipendenti o fattori predisponenti utilizzati sono le stesse utilizzate per l'analisi a scala regionale (vedi par. 3.1.2), con la sola variazione riguardante la litologia, rappresentata da una mappa geolitologica derivata dal foglio geologico n. 393 "Trivento" (ISPRA) (Figura 3.2-2). La mappa ottenuta è stata riclassificata in quattro classi: alta, media, bassa e molto bassa. All'interno dei risultati non verranno presentati i pesi caratteristici delle varie classi delle variabili così come stato fatto per l'analisi bivariata a scala regionale; per questo progetto, infatti, la mappa è stata prodotta solo al fine di mettere a punto una nuova metodologia per la stima del danno agricolo in funzione anche della propensione al dissesto da frana. Le caratteristiche dei vari fattori verranno inoltre, esaminate attraverso la FR utilizzata nell'ambito dello studio di suscettibilità multi-temporale condotta utilizzando il metodo SMCE.

Il metodo qui proposto per il calcolo del danno agricolo da frana prevede innanzitutto l'attribuzione ad ogni classe di copertura del suolo dell'area di studio di un valore agricolo medio catastale (VAM), riferito alla Zona Agraria 2 della Regione Molise per l'anno 2012 (BURM, 2012), espresso in €/m². Volendo valutare solo il danno agricolo in funzione del dissesto da frana, alle zone urbanizzate non è stato attribuito alcun valore monetario, mentre le categorie catastali "bosco misto", "bosco ceduo", "pascolo arborato" e "pascolo cespugliato" sono state accorpate in un'unica categoria, mancando una diretta corrispondenza tra le suddette diciture del Corine Land Cover 2006 e quelle riportate all'interno delle liste catastali. I valori attribuiti sono riportati in Tabella 3.2-2 e spazializzati all'interno del bacino in ambiente GIS (Figura 3.2-10).

Tabella 3.2-2 Valori agricoli medi sulla base della copertura del suolo, determinate tramite la banca dati dell'Agenzia delle Entrate.

Classi di copertura del suolo (Corine land cover 2006)	VAM (€/m ²) (Agenzia delle entrate Italia)
Aree a pascolo naturale	0.37
Brughiere e cespuglieti	0.36
Aree occupate da colture agraria con presenza di spazi naturali	0.95
Boschi	0.49

Seminativi in aree non irrigue	0.84
Uliveti	1.72

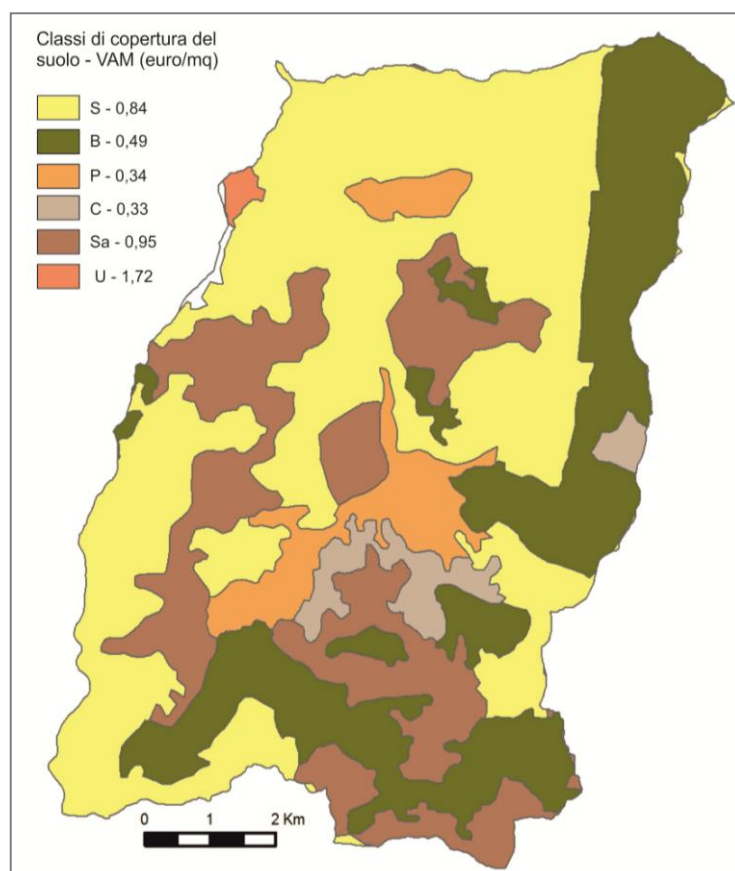


Figura 3.2-10 Carta dell'uso del suolo con associato il Valore Agricolo Medio (VAM) catastale. Legenda: S) seminativi in aree non irrigue; B) Boschi; P) Aree a pascolo naturale; C) Brughiere e cespuglieti; Sa) Aree occupate da colture agraria con presenza di spazi naturali; U) Uliveti

In un primo momento è stata realizzata un'analisi del danno attuale, inteso come la perdita di valore fondiario dovuto alle frane presenti già mappate dall'inventario IFFI.

A tal fine dal database del progetto IFFI sono state estratte le frane ricadenti nell'area di studio e riclassificate in base allo stato di attività (Figura 3.2-11): ad ognuna delle quattro classi di attività previste dal progetto IFFI (attiva, quiescente, stabilizzata e relitta) è stato quindi attribuito un peso definito come indice di danno (DI), variabile tra 0 per le frane "relitte" a 1 per le frane "attive" (vedi Tabella 3.2-3).

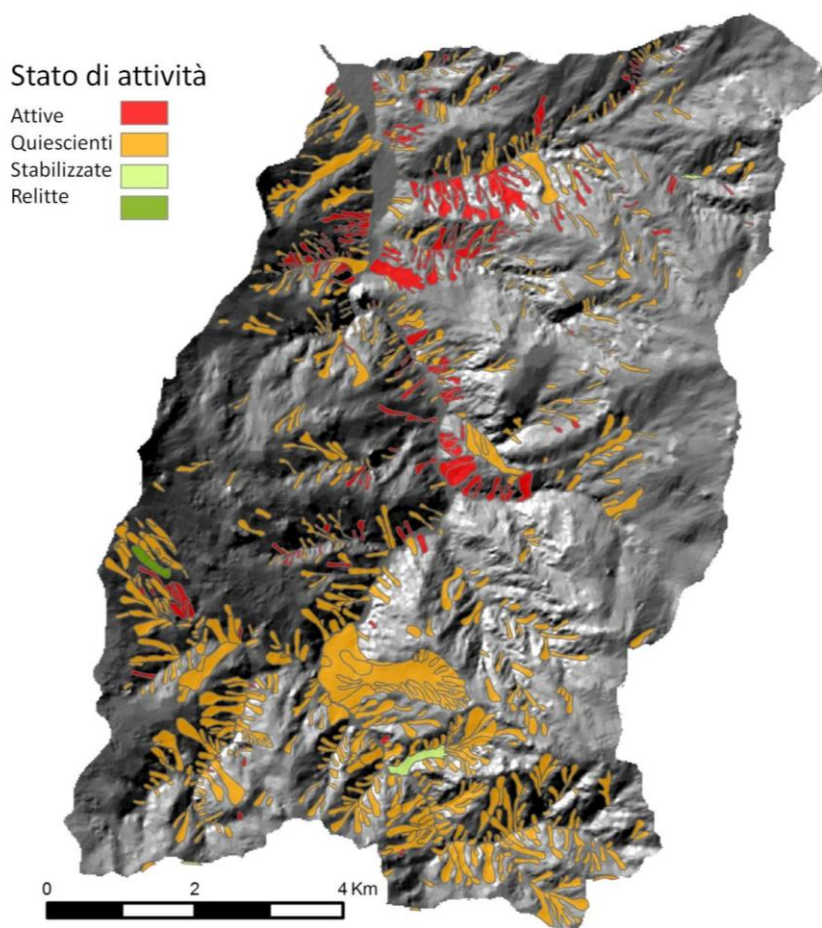


Figura 3.2-11 Mappa dei fenomeni franosi in relazione allo stato di attività (fonte: progetto IFFI).

Tabella 3.2-3 Valori dell'indice di danno (damage index, DI) in relazione al tipo di attività di frane esistenti e riportate nell'IFFI.

Stato di attività delle frane	Indice di danno (DI)
Attiva	1
Quiescente	0.8
Stabilizzata	0.3
Relitta	0

Successivamente è stato calcolato il Valore Agricolo medio Totale (VAT) per tutta l'area di studio andando a moltiplicare il valore dell'estensione di ogni singola copertura del suolo per il valore agricolo medio corrispondente in m².

Interpolando in ambiente GIS la mappa dei valori di VAM con quella dell'Indice di Danno (*Damage Index*, DI) delle aree in frana, si è ottenuta una mappa che stima il Danno Economico Agricolo (DV):

Equazione 3.2-2

$$DV = VAM \times DI$$

Sottraendo poi al Valore Agricolo totale (VAT) il Danno Economico (DV) si ottiene infine il Valore Agricolo Reale VAR:

$$\text{Equazione 3.2-3} \quad \text{VAR} = \text{VAT} - \text{DV}$$

La seconda parte del lavoro è consistita nel realizzare il calcolo della possibile perdita di Valore Agricolo Medio in termini di esposizione futura. Si è quindi pensato di applicare un indice di danno atteso (DIA) ad ogni classe di suscettibilità, tenendo in considerazione però le aree in frana già esistenti e censite dall'inventario IFFI. Nella tabella successiva (Tabella 3.2-4) vengono esposti i valori di indice di danno proposti, in funzione delle classi di suscettibilità.

Ad esempio ad un'area in cui l'inventario IFFI non segnala alcun fenomeno franoso, ma che è contraddistinta da una classe di suscettibilità media, è stato dato un valore di indice di danno pari a 0,3 con una perdita del VAM di circa il 30%. Allo stesso modo è stato assegnato un indice di danno pari a 0,6 per le aree in frana con stato di attività quiescente e ricadenti in una classe bassa di suscettibilità, ottenendo una perdita del valore agricolo medio pari al 60%.

Tabella 3.2-4 Matrice per gli indici di danno in relazione alla suscettibilità da frana basata sul giudizio di esperti

Classe di suscettibilità →	Alta suscettibilità	Media suscettibilità	Bassa suscettibilità	Suscettibilità estremamente bassa
Attività frana ↓				
Attiva	1	1	1	1
Quiescente	1	0,8	0,6	0,4
Stabilizzata	0,5	0,3	0,1	0
Relitta	0,5	0,3	0,1	0
No frana	0,5	0,3	0,1	0

Interpolando quindi nuovamente in ambiente GIS gli indici di danno atteso con i valori di VAM si è ottenuto il valore del danno economico atteso per tutta l'area (DEA):

$$\text{Equazione 3.2-4} \quad \text{DEA} = \text{VAM} \times \text{DIA}$$

Infine, è stato valutato il valore agricolo atteso (VAA) sottraendo al valore agricolo totale (VAT) il danno economico atteso (DEA):

$$\text{Equazione 3.2-5} \quad \text{VAA} = \text{VAT} - \text{DEA}$$

Questo DEA tiene dunque conto sia delle frane esistenti che della propensione al dissesto del territorio.

Il lavoro realizzato è stato presentato al convegno internazionale EUGEO tenutosi a Budapest dal 30 Agosto al 2 Settembre 2015 come poster dal titolo " *Estimation of land value damage*

caused by landslides by means of matrices for different degree of knowledge: a case study from Molise region (Italy)" (autori: Aucelli P.P.C., Balteanu D., Pisano L., Roskopf C.M., Zumpano V., Scorpio V.).

4 Risultati e discussione

Nel presente capitolo sono presentati e discussi i risultati ottenuti nella realizzazione di mappe di suscettibilità da frana a scala regionale e a scala di bacino. Questo consente di identificare le aree con maggiore propensione al dissesto nel territorio molisano, gli elementi esposti al rischio frana e la loro possibile correlazione con lo stato di salute demografico.

Inoltre saranno presentati i risultati ottenuti dall'elaborazione di suscettibilità mediante metodo semi-quantitativo che valuta l'influenza dei cambiamenti di copertura del suolo rispetto alla distribuzione spaziale e temporale dei fenomeni franosi. Verranno poi descritte le variazioni della propensione al dissesto osservate, considerando possibili scenari futuri di cambiamento di coperture del suolo.

Infine è presentata una stima speditiva del possibile danno agricolo in termini di valore fondiario per l'area rurale del bacino del Rivo.

4.1 Risultati ottenuti a scala regionale

4.1.1 Mappa di suscettibilità per la regione Molise

Di seguito si presentano le elaborazioni effettuate con i diversi metodi statistici per la redazione di una mappa regionale della suscettibilità da frana, investigando le relazioni esistenti tra i fenomeni franosi e i fattori predisponenti. I risultati ottenuti sono stati riportati in parte in Pisano et al. (2016a).

Sono quindi esplicitati e discussi i risultati ottenuti in maniera critica dal punto di vista statistico di bontà del modello, evidenziando poi le zone a minore e maggiore franosità identificate dalle mappe ottenute. Da tale applicazione è stata quindi selezionata una mappa ritenuta la più rappresentativa per la propensione al dissesto da frana nella regione.

4.1.1.1 *Weight of Evidence*

L'applicazione del metodo della *Weight of Evidence* (WOFE) ha portato alla realizzazione di 8 modelli diversi di suscettibilità regionale, la cui bontà è stata valutata mediante l'utilizzo della *Receiving Operating Characteristic* (ROC) *Curve*. Da un confronto a posteriori dell'area sottesa da tale curva (AUC), come si evince dalla Tabella 4.1-1 il miglior modello è risultato essere quello definito T7, che presenta il valore più alto di AUC.

Tabella 4.1-1 Combinazioni di variabili usate; numero di punti di frana selezionati per il training del modello e valori dell'area sottesa dalla curva (AUC) ROC (Receiving Operating Characteristic).

	Pendenza	Esposizione	Litologia	Land Cover	Rilievo Interno	Distanza dalle Strade	Altitudine		AUC ROC
T1	V	V	V	V	V	V	V	50% dei punti frana	0,709
T2	V	V	V	V	V		V		0,748
T3	V	V	V	V	V	V			0,769
T4	V	V	V	V	V				0,784
T5	V	V	V	V	V	V	V	10% dei punti frana	0,735
T6	V	V	V	V	V		V		0,754
T7	V	V	V	V	V				0,789
T8	V	V	V	V	V	V			0,774

Nel miglior modello ottenuto individuato mediante i valori della AUC ROC Curve, sono state utilizzate 44 variabili indipendenti di input rappresentate dalle classi dei parametri o fattori predisponenti scelti per la valutazione della suscettibilità della frana. Le variabili comprendono: 9 classi per l'esposizione, 10 per l'energia del rilievo, 8 per la litologia, 7 per la copertura del suolo e 10 per la pendenza.

In seguito all'analisi effettuata mediante il pacchetto SDM di ArcGis, è stato possibile estrapolare la Tabella 4.1-2, grazie alla quale è possibile ricavare informazioni statistiche utili a correlare le singole classi dei fattori predisponenti con la variabile dipendente, cioè i fenomeni franosi. Come discusso nel paragrafo 3.1.2, un peso $W+$ positivo, $W-$ negativo e un *contrast* (C) positivo indicano una correlazione spaziale positiva; al contrario valori negativi di C, $W+$ negativi, e $W-$ positivi indicano una correlazione spaziale negativa, mentre valori uguali o prossimi allo zero indicano che la classe considerata non ha alcuna influenza per l'analisi che si sta effettuando.

Tabella 4.1-2 Valori di $W+$, $W-$ e *contrast* riscontrati per ogni classe delle variabili utilizzate nell'analisi di suscettibilità. Sono riportati in rosso i valori di *contrast* positivi maggiori.

Fattore predisponente	Classe	$W+$	$W-$	<i>CONTRAST</i>
Esposizione	Zone pianeggianti	-1,2466	0,0391	-1,2857
	N	-0,0037	0,0006	-0,0044
	NE	0,1007	-0,0182	0,1190
	E	0,0948	-0,0146	0,1093
	SE	0,0895	-0,0120	0,1016
	S	-0,0305	0,0038	-0,0343
	SW	-0,1740	0,0167	-0,1907
	W	0,0084	-0,0010	0,0094
	NW	0,1606	-0,0195	0,1801
Internal relief (m/ha)	<=3,3	-1,0695	0,0652	-1,1347
	3,3-8,3	-0,3432	0,0327	-0,3760
	8,3-12,5	0,3828	-0,0546	0,4374
	12,5-15,8	0,5858	-0,0926	0,6785

	15,8-18,3	0,3727	-0,0552	0,4280
	18,3-21,6	0,2920	-0,0392	0,3312
	21,6-25,8	0,0893	-0,0104	0,0997
	25,8-30,8	-0,1926	0,0202	-0,2129
	30,8-38,2	-0,5996	0,0465	-0,6461
	>=38,2	-1,2424	0,0713	-1,3137
Litologia	Sabbie e conglomerati	-1,7834	0,1545	-1,9379
	Calcari e dolomie	-2,2382	0,0367	-2,2749
	Brecce e calcilutiti	-1,3527	0,0945	-1,4472
	Calcari marnosi e marne	-0,2460	0,0241	-0,2701
	Argille e sabbie	-0,5159	0,0268	-0,5427
	Arenarie e conglomerati	0,3504	-0,1171	0,4675
	Argille Varicolori	0,6978	-0,3120	1,0098
	Depositi arenaceo marnosi	0,1418	-0,0151	0,1569
Copertura del suolo	Zone Urbane	-3,4235	0,0142	-3,4377
	Coltivo	0,1748	-0,5336	0,7084
	Praterie	-0,3786	0,0111	-0,3896
	Aree boscate	-0,4385	0,1071	-0,5456
	Cespuglieti	0,0000	0,0000	0,0000
	Zone denudate	-1,3584	0,0168	-1,3752
	Zone umide	0,0000	0,0000	0,0000
Pendenza (°)	<=1,5	-3,1345	0,0878	-3,2223
	1,5-4,1	-2,0107	0,1162	-2,1269
	4,1-6,4	-0,8136	0,0593	-0,8729
	6,4-8,2	-0,1114	0,0115	-0,1228
	8,2-9,6	0,1778	-0,0208	0,1986
	9,6-11,4	0,4750	-0,0737	0,5486
	11,4-13,4	0,6016	-0,0958	0,6974
	13,4-16,4	0,6598	-0,1046	0,7643
	16,4-21,9	0,3404	-0,0466	0,3870
	21,9-74,5	-0,5246	0,0412	-0,5658

Nelle tabelle sono riportati in rosso i 10 valori di *contrast* (C) positivi più alti, indicativi di una maggiore influenza nella predisposizione alle frane. Nello specifico, all'interno del fattore predisponente "Pendenza" le classi che danno una maggiore predisposizione alla franosità sono quelle comprese tra 9,6-11,4°, 11,4-13,4°, 13,4-16,3°. Ciò può essere attribuito al fatto che i fenomeni analizzati (di tipo scivolamento, colata e complessi) sono fortemente influenzati dalla topografia, nel senso che pendenze troppo basse non forniscono l'energia necessaria al movimento; al contrario, per pendenze troppo elevate le rocce su cui i fenomeni si impostano generalmente hanno comportamento litoide (es. calcari), con minore sviluppo di fenomeni franosi, per lo più ricadenti nelle tipologie di crolli e ribaltamenti, non considerati in questo studio. Inoltre i risultati qui presentati dimostrano che la maggior parte delle frane si impostano su Argille Varicolori, notoriamente tra le formazioni dell'Appennino maggiormente propense al dissesto.

Per quel che riguarda la copertura del suolo, la classe che statisticamente risulta essere più favorevole alla franosità è quella delle zone a coltivo, mentre aree con vegetazione rada o assente mostrano la maggiore correlazione negativa. La scarsa propensione al dissesto in aeree non vegetate è probabilmente legata alla distribuzione spaziale del fattore predisponente

derivato dal *Corine Land Cover* 2006. Infatti queste aree sono associate ai settori occidentali della regione, dove la presenza di complessi rocciosi ad alte pendenze non permette l'attecchimento della vegetazione al substrato affiorante. La scala di dettaglio del *Corine Land Cover*, che ha un'unità minima cartografabile di 25 ettari, non consente di individuare molte aree caratterizzate da erosione spinta che danno luogo a fenomeni di denudazione. Sulla base di osservazioni di campagna, tali fenomeni risultano di dimensioni molto limitate, e pertanto vengono accorpate in altre categorie di uso del suolo. Valori negativi di *contrast* per le aree urbanizzate e le superfici boscate indicano una correlazione negativa rispetto alla franosità.

Le Argille Varicolori rappresentano, tra tutte le litologie, la classe con il *contrast* più alto, seguita dalla classe arenaceo-conglomeratica e subordinatamente dai depositi arenaceo-marnosi.

Per quanto riguarda l'energia del rilievo, le classi aventi *contrast* (C) maggiore sono quelle che vanno da 8,3 a 12,5 m/ha, 12,5-15,8 m/ha 15,8-18,3 m/ha. Queste corrispondono alle aree centrali del territorio regionale i cui valori devono essere correlati con le caratteristiche dei litotipi affioranti. Ciò conferma che la tipologia di frane utilizzate si sviluppa principalmente su terreni argillosi corrispondenti alle Argille Varicolori.

Dai valori dell'analisi statistica ottenuti per l'esposizione, si evince che, seppur con bassi valori positivi di *contrast* (C) le classi aventi maggior influenza sulla franosità sono quelle i cui versanti sono orientati a NO e NE. Con ogni probabilità questo elemento è legato alla maggiore umidità del terreno, sottoposto ad un grado di incidenza dei raggi solari inferiore rispetto agli altri settori.

In basso si riporta la mappa avente il miglior valore di ROC, scelta tra tutte quelle ottenute applicando il metodo *Weight of Evidence* (Figura 4.1-1). La bontà della mappa in termini di capacità predittiva è confermata oltre che dal buon valore della curva ROC, anche dal fatto che circa il 77% dei punti di validazione ricade nelle classi di suscettibilità alta e molto alta (Figura 4.1-1). D'altra parte nelle classi di suscettibilità bassa e molto bassa ricade una percentuale di punti dell'8,6%. Ciò significa che il modello bivariato riesce a valutare in maniera soddisfacente la suscettibilità da frana nell'area studio.

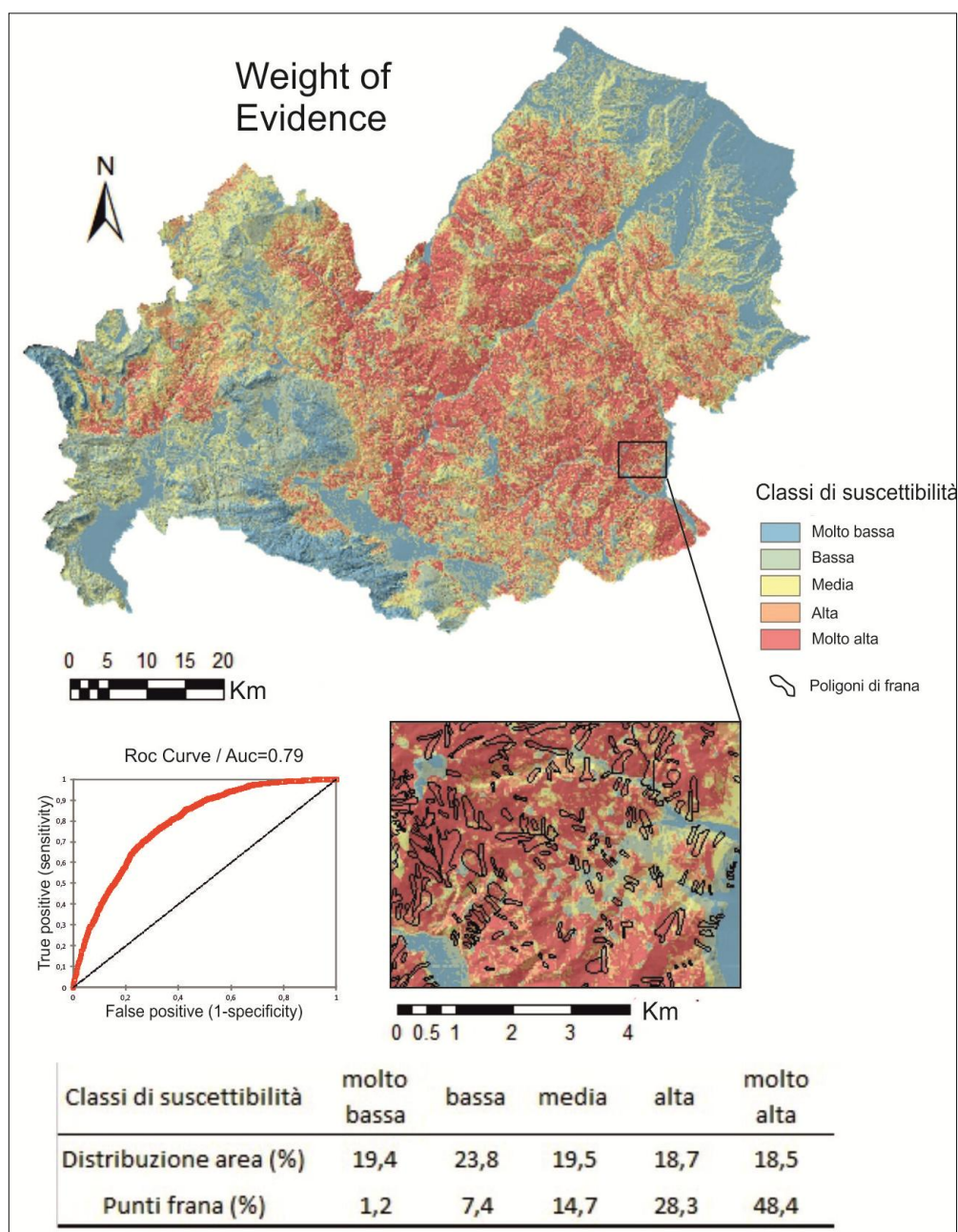


Figura 4.1-1 Mappa ottenuta come miglior risultato dall'applicazione del metodo weight of evidence. In basso a sinistra è riportata la curva ROC ottenuta per tale modello (modificata da Pisano et al., 2016a). Nella tabella in basso sono riportate le percentuali delle aree nelle rispettive classi di suscettibilità e la percentuale dei punti di validazione.

4.1.1.2 Logistic Regression

Dall'applicazione del metodo statistico multivariato *stepwise forward logistic regression* è stato possibile realizzare una mappa di suscettibilità da confrontare con quella ottenuta mediante il metodo della WOFE, con l'obiettivo di scegliere la mappa che rappresenti il più fedelmente possibile le criticità dell'area molisana.

Per ogni classe di ciascuna variabile indipendente (fattore predisponente) è stata calcolata la densità in riferimento agli eventi occorsi e mappati dall'inventario dei fenomeni franosi IFFI, così come descritto nel capitolo dei metodi (par. 3.1.2.2).

I dati di densità ottenuti sono riportati in Tabella 4.1-3.

Tabella 4.1-3 Valori di estensione areale, frequenza, e densità riscontrati per ogni classe delle variabili utilizzate nell'analisi di suscettibilità. Sono riportati in rosso i valori di densità maggiori.

Fattore predisponente	Classe	Estensione della classe nell'area studio (Km ²)	Frequenza delle classi delle variabili indipendenti nell'area di studio (%)	Estensione delle aree in frana nelle singole classi (Km ²)	Densità delle aree in frana rispetto alla superficie occupata da ogni classe all'interno dell'area di studio (%)
Internal relief (m/ha)	0-18,4	2267,81	50,84	222,31	4,54
	18,4-35,9	1677,45	37,60	340,47	9,40
	35,9-53,4	356,99	8,00	33,82	4,39
	53,4-70,9	107,11	2,40	6,70	2,90
	70,9-88,5	38,43	0,86	3,44	4,15
	88,5-106	10,05	0,23	1,44	6,62
	106-123,5	1,77	0,04	0,48	12,42
	123,5-141,1	1,12	0,03	0,37	15,36
	141,1-158,6	0,22	0,00	0,10	20,59
	>=158,6	0,10	0,00	0,04	19,64
Litologia	Sabbie e conglomerati	741,81	16,78	27,61	4,03
	Calcari e dolomie	178,31	4,03	7,34	4,45
	Brecce e calcilutiti	523,09	11,83	31,30	6,47
	Calcari marnosi e marne	445,97	10,09	53,98	13,10
	Argille e sabbie	279,67	6,33	24,36	9,43
	Arenarie e conglomerati	924,57	20,91	175,86	20,58
	Argille Varicolori	931,03	21,06	233,76	27,17
	Depositi arenaceo-marnosi	396,16	8,96	54,09	14,77
Copertura del suolo	Zone Urbane	64,80	1,46	1,68	0,00
	Coltivo	3033,58	68,40	481,41	28,63
	Praterie	151,16	3,41	15,35	18,32
	Aree boscate	1071,08	24,15	103,42	17,42
	Cespuglieti	5,49	0,12	0,56	18,26
	Zone denudate	98,61	2,22	6,70	12,26
	Zone umide	10,03	0,23	0,02	0,43
Pendenza (°)	0-7,5	1632,77	36,80	110,41	3,63
	7,5-14,9	1754,99	39,55	354,34	10,84
	14,9-22,4	649,12	14,63	109,47	9,06
	22,4-29,8	241,11	5,43	21,53	4,80
	29,8-37,3	114,24	2,57	8,35	3,92
	37,3-44,7	35,04	0,79	3,23	4,95
	44,7-52,2	8,56	0,19	1,34	8,41
	52,2-59,6	1,33	0,03	0,40	16,25
	59,6-67,1	0,25	0,01	0,10	21,71
	67,1-74,5	0,03	0,00	0,01	16,43
Altitudine	0 - 217,5	764,69	17,23	62,77	7,60
	217,5-435	745,10	16,79	157,11	19,53

	435-652,5	1213,97	27,36	211,14	16,11
	652,5-870	1002,00	22,58	129,50	11,97
	870-1087,5	397,38	8,96	32,50	7,58
	1087,5-1305	205,81	4,64	10,38	4,67
	1305-1522,5	70,26	1,58	2,60	3,43
	1522,5-1740	26,68	0,60	1,57	5,44
	1740-1957,5	9,71	0,22	1,40	13,35
	1957,5-2175	1,83	0,04	0,20	10,30
Esposizione	Zone pianeggianti	234,24	5,68	12,73	3,81
	N	463,00	11,23	70,76	10,72
	NE	694,08	16,84	96,91	9,79
	E	583,48	14,16	85,91	10,33
	SE	563,34	13,67	81,31	10,12
	S	465,76	11,30	65,29	9,83
	SW	487,26	11,82	63,35	9,12
	W	434,79	10,55	57,81	9,33
Distanza dalle strade (m)	NW	195,57	4,75	75,10	26,94
	0-50	309,69	6,98	24,70	17,89
	50-100	276,77	6,24	28,24	22,89
	100-150	253,21	5,71	29,80	26,40
	>=150	3597,77	81,08	526,40	32,82

Analizzando i valori di densità di frana per ogni classe di ciascuna variabile si può osservare come per l'*internal relief* la densità di aree in frana maggiore è distribuita nelle classi più alte. Tuttavia tra le classi più estese nel territorio, che sono sostanzialmente quelle che vanno da 0 a 70,9 m/ha, quella che risulta avere una densità maggiore pari a 9,40% è la classe compresa tra 18,4 e 35,9 m/ha.

Per quel che riguarda la litologia, la distribuzione delle classi risulta perlopiù omogenea nel territorio, con punte maggiori del 20% per le Argille Varicolori e per i litotipi arenaceo-conglomeratici. La densità di frana nelle singole classi mostra valori di 27% per le Argille Varicolori, e subordinatamente circa 20% e 15%, rispettivamente, per i depositi caratterizzati da arenarie e conglomerati e per i depositi arenaceo-marnosi.

La copertura del suolo mostra valori maggiori di densità di frana per le aree a coltivo (28,63%), le aree a praterie e i cespuglieti (entrambe circa 18%).

Le classi di pendenze più alte mostrano densità di frana maggiore, tuttavia queste occupano una parte estremamente limitata del territorio oggetto di analisi. Le classi che vanno da 7,5° a 14,9° e quelle che vanno da 14,9 a 22,7° sono tra le più estese, e presentano alti valori di densità da frana nelle singole classi, con valori che si aggirano attorno a 10%.

La classi di altitudine con la maggiore densità di classe, corrispondenti anche ad una buona parte dell'estensione del territorio regionale, sono quelle che vanno da 217 m a 435 m s.l.m. e da 435 a 622 m s.l.m. Rispettivamente, i valori di densità sono 19,53 e 16,11%.

Densità maggiori si osservano poi nei versanti orientati a NW (circa 27%), mentre gli altri mostrano tutti valori inferiori.

Infine, la distanza dai tagli stradali mostra valori di densità crescenti con la distanza, il che indicherebbe una non consistenza tra tale fattore e i fenomeni franosi mappati.

Tutti questi valori di densità sono stati utilizzati nell'analisi di regressione logistica, in cui le variabili indipendenti sono state indicizzate secondo la procedura descritta nel capitolo dei metodi, successivamente determinando i pesi del modello di regressione logistica, attraverso il metodo della *stepwise forward* utilizzando il software *XLstat®*.

Come evidenziato nel capitolo dei metodi, per questa analisi il campionamento dei punti frana/non frana (variabile dipendente) è stato effettuato prima considerando il 50% del *dataset*, e successivamente prendendo solo il 10% di esso. Sulla base di questi dati di partenza è stato applicato il modello di regressione logistica che ha mostrato valori di AUC ROC nei set di validazione, pari allo 0,753 considerando l'intero *dataset*, e a 0,774 considerandone il solo 10% (Pisano et al., 2016a).

Il criterio *stepwise forward* ha escluso in entrambi i modelli le variabili della distanza ai tagli stradali e *l'internal relief* poichè caratterizzati da uno scarso contributo predittivo rispetto al sistema di analisi. La bontà delle analisi effettuate è stata valutata in base ai valori di differenti R^2 sintetizzati in Tabella 4.1-4. Questo parametro misura con valori che vanno da 0 a 1 la bontà del modello rispetto al *dataset*. R^2 uguale a 1 indica un perfetto fit mentre 0 indica nessuna relazione. Quando R^2 è maggiore di 0,2, indica un relativo buon fit del modello (Clark e Hosking, 1986; Regmi et al., 2014). Le Tabella 4.1-4 e Tabella 4.1-5 riportano esclusivamente i valori dei coefficienti del modello che utilizza solo il 10% del *dataset*, il quale come in precedenza affermato ha presentato il miglior valore *output* nella fase di validazione (AUC ROC).

Tabella 4.1-4 Coefficienti di bontà di adattamento.

Statistica	
Osservazioni	4200
GDL	4192
-2 Log(Verosimiglianza)	4647,452
R^2 (McFadden)	0,202
R^2 (Cox and Snell)	0,244
R^2 (Nagelkerke)	0,325
ROC	0,772

Nei test di regressione logistica le variabili che mostrano coefficienti β negativi indicano un contributo a non favorire il fenomeno franoso, al contrario coefficienti positivi indicano che quella variabile ha un effetto destabilizzante, quindi contribuisce al verificarsi del fenomeno studiato. Dai risultati, esposti in Tabella 4.1-5 si evince come i maggiori valori del coefficiente della variabile predittiva appartengano ai fattori di esposizione e litologia. Il Chi-quadro di Wald esamina se una variabile indipendente (fattori predisponenti) ha un rapporto

statisticamente significativo con la variabile dipendente. Quanto più esso è elevato, tanto più la variabile è significativa all'interno del modello (Nandi et al., 2009).

Tabella 4.1-5 Parametri del modello di regressione logistica.

Fonte	Coefficienti variabile predittiva	Errore standard	Chi-quadro di Wald
Intercetta	-4,9829	0,3465	206,8562
Pendenza	0,0514	0,0036	202,8050
Copertura del suolo	0,0257	0,0057	20,0099
Litologia	0,0753	0,0046	270,6755
Internal relief	0,0000	0,0000	
Distanza dalle strade	0,0000	0,0000	
Esposizione	0,0838	0,0247	11,5549
Altitudine	0,0428	0,0059	52,1862

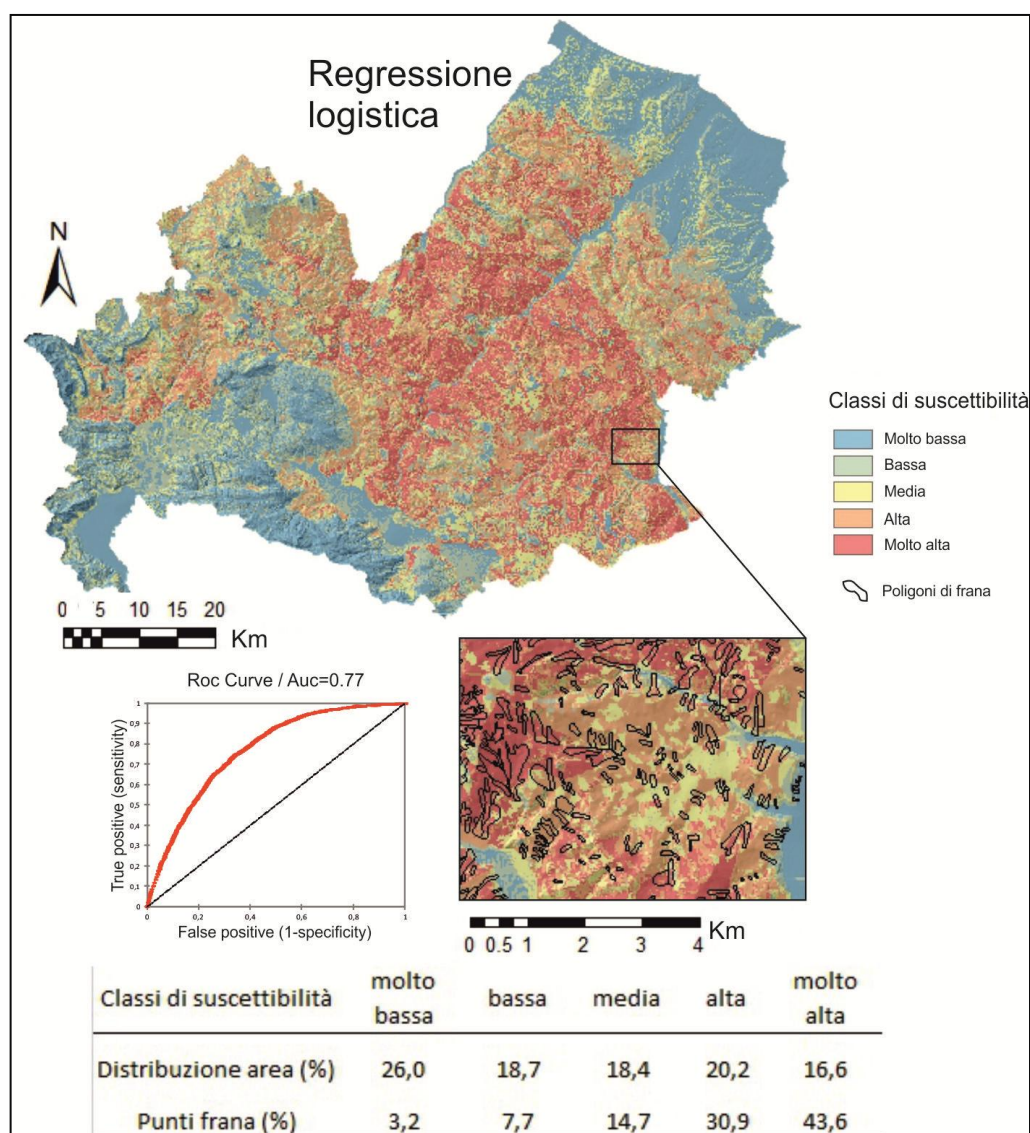


Figura 4.1-2 Mappa ottenuta come miglior risultato dall'applicazione del metodo logistic regression. In basso a sinistra è riportata la curva ROC ottenuta per tale modello (modificata da Pisano et al., 2016a). Nella tabella sono riportate le percentuali delle aree nelle rispettive classi di suscettibilità e la percentuale dei punti di validazione.

Come si evince dai valori riportati in Figura 4.1-2, il 36,8% ricade nelle più alte classi di suscettibilità e la maggior parte dei punti in frana (74,5%) ricade in queste stesse classi. Al contrario solo il 10,9% ricade nelle classi più basse.

Dall'analisi dei due migliori *output* dei modelli si evince come innanzitutto questi siano caratterizzati da valori molto simili della curva ROC, anche se leggermente a favore del modello realizzato con il metodo statistico bivariato della *Weight of Evidence*. In entrambi i casi, comunque, i valori di AUC ROC possono considerarsi soddisfacenti. Secondo Swets, (1988) valori di AUC ROC tra 0,7 e 0,9 indicano una buona capacità predittiva del modello, mentre valori più alti di 0,9 mostrano tipicamente alti gradi di accuratezza nella classificazione dei modelli. Al contrario valori inferiori a 0,5 indicano che la *performance* dei modelli non ha nessun potere discriminante.

Da una prima visione a grande scala inoltre, il dato sembra essere sostanzialmente spazializzato in maniera simile in entrambi i modelli, con classi di suscettibilità più elevata nei settori centrali della regione. In questo settore infatti, le Argille Varicolori sono la litologia principale affiorante essendo diffuse lungo l'intera catena appenninica.

Le Argille Varicolori sono costituite da argille scistose tettonizzate e sono tra le litologie più propense al dissesto dell'intera Italia meridionale (Cotecchia e Melidoro, 1974; Di Maio et al., 2010; Borgomeo et al., 2014). Esse, come tutte le argille con struttura interna caotica, sono meccanicamente deboli e diversi studi riportano come siano molto favorevoli all'instabilità di pendio (Del Prete, 1993; Fearon e Coop, 2002; Picarelli et al., 2005; Cotecchia et al., 2015). L'alto grado di suscettibilità alla franosità è inoltre, una conseguenza della loro tessitura scagliosa che diminuisce la resistenza del materiale dividendolo in frammenti (o scaglie) separate da fessure. Per questa particolare complessità strutturale, le Argille Varicolori sono state uno dei maggiori argomenti di analisi soprattutto dal punto di vista geotecnico da molti decenni (Terzaghi, 1936; Petley, 1984; Picarelli e Olivares, 2004; Silvestri et al., 2007; Airò Farulla et al., 2010). La loro bassa permeabilità porta ad un aumento delle pressioni neutre e la loro struttura interna deformata e complessa contribuiscono a favorire la loro instabilità. Analisi di laboratorio condotte su campioni provenienti dall'Appennino mostrano che l'incremento del contenuto d'acqua causa un cambiamento nello stato di tensione delle argille, un processo noto come *softening* (Picarelli et al., 2006). Borgomeo et al., (2014) hanno dimostrato statisticamente, come la pericolosità da frana in aree dominate da Argille Varicolori in concomitanza con pendenze $>10^\circ$ sia molto elevata, per cui interventi di mitigazione devono essere operati in queste aree attraverso misure di drenaggio o strutture di rinforzo.

Nei settori NE e SW si osserva una propensione al dissesto che spazia da media e bassa suscettibilità, dovuta probabilmente alla presenza di litologie meno favorevoli alla franosità nei settori SW, e a bassi gradienti di pendenza nei settori NE. Medio-alte suscettibilità si riscontrano nei settori NW (alto Molise), dove il Flysch di Agnone è caratterizzato da un contenuto pelitico abbondante.

Entrambe le mappe ottenute, seppure con metodi diversi, possono considerarsi fedeli alla rappresentazione della franosità dell'area; ciò nonostante, da un'analisi esperta di maggior dettaglio, è possibile notare alcune differenze. Considerando le caratteristiche geomorfologiche e fisiografiche dell'area di studio, e in base alle osservazioni di campagna, è possibile accertare che in alcuni casi la mappa ottenuta mediante statistica bivariata sembra sovrastimare la suscettibilità in alcune aree come si può osservare dagli ingrandimenti delle Figura 4.1-1 e Figura 4.1-2. Per cui la mappa ottenuta mediante regressione logistica è stata scelta come più rappresentativa dell'area.

4.1.2 Valutazione dell'esposizione degli elementi a rischio da frana e relativa incidenza sullo stato di malessere demografico

I risultati ottenuti seguendo la distribuzione della suscettibilità da frana sugli elementi a rischio considerati per la nostra analisi, saranno di seguito esplicitati e messi in relazione allo stato di malessere demografico della popolazione, calcolato sulla base di dati raccolti per un intervallo di tempo che va dal 1951 al 2011.

La distribuzione della suscettibilità contribuisce in maniera diretta al grado di esposizione degli elementi considerati, che nel nostro caso sono gli edifici, le strade principali e le tratte ferroviarie. I risultati ottenuti vengono presentati in Figura 4.1-3 per quanto riguarda gli edifici e tratte ferroviarie e in Figura 4.1-4 per le strade principali.

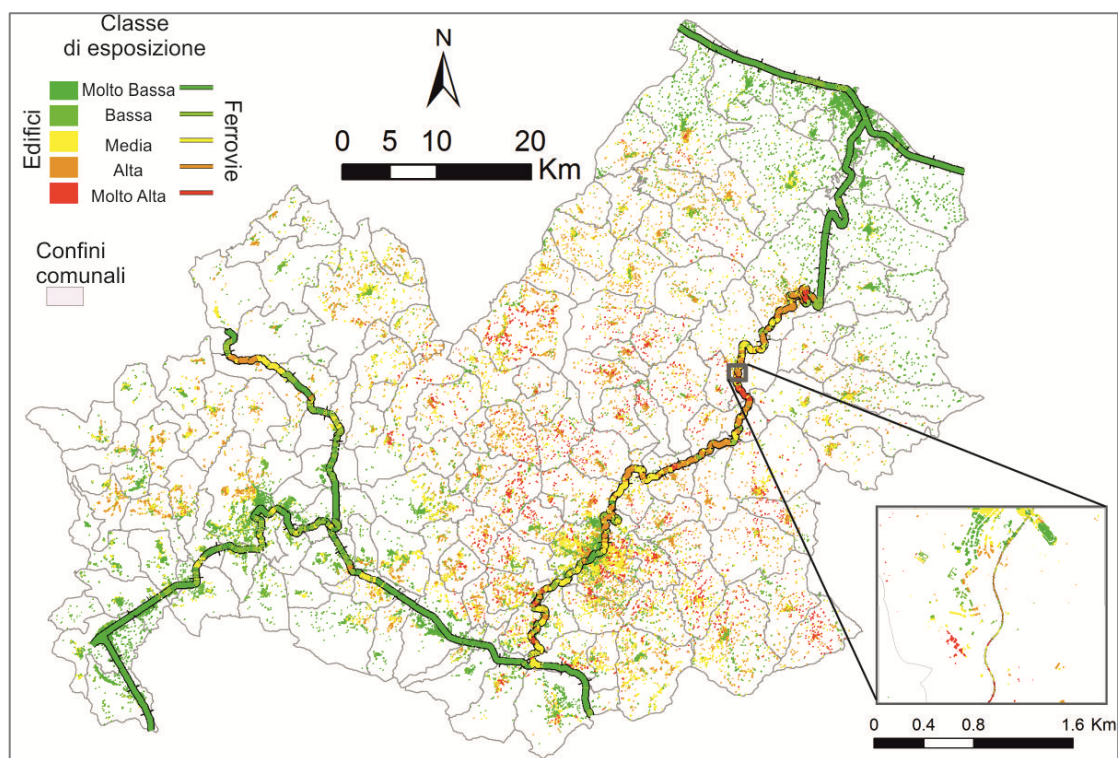


Figura 4.1-3 Distribuzione di edifici e ferrovie nelle classi di esposizione.

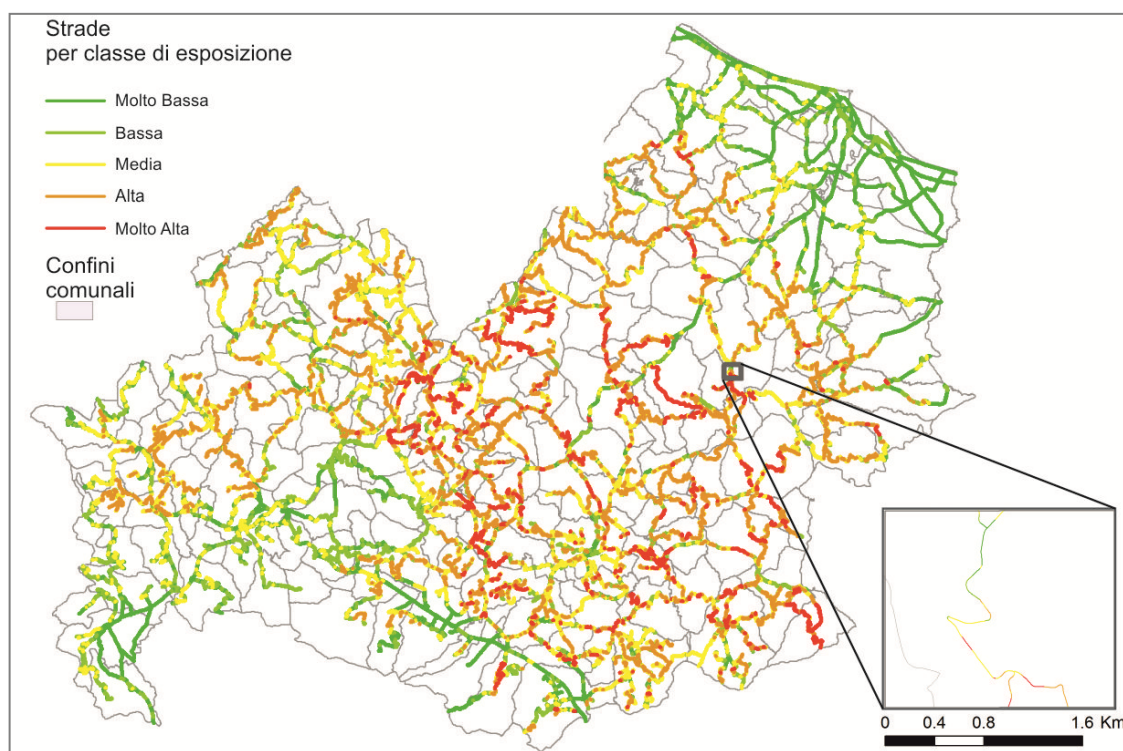


Figura 4.1-4 Distribuzione delle strade nelle classi di esposizione

E' possibile rilevare immediatamente come gli elementi localizzati nella zona centrale della regione siano quelli più esposti (Figura 4.1-2). A scala regionale si nota come più del 15% degli edifici e circa il 12% delle ferrovie ricada nelle classi di suscettibilità più alta (alta

e molto alta). Per quanto riguarda le strade si ha una percentuale maggiore del 25% ricadente nelle classi più alte, come mostra la Tabella 4.1-6.

Al fine di analizzare a scala comunale la severità del possibile impatto delle frane nell'area molisana sulle infrastrutture considerate, è stata calcolata per ogni comune la percentuale di infrastrutture ricadenti nelle più alte classi di esposizione (alta e molto alta).

Tabella 4.1-6 Percentuali totali dei tipi di elementi esposti rispetto al totale presente nella regione.

Classe di esposizione	% di edifici ricadenti in ogni classe	% di strade ricadenti in ogni classe	% di tratte ferrate ricadenti in ogni classe
Molto bassa	41.33	28.20	54.70
Bassa	22.01	22.08	18.05
Media	20.63	25.07	15.28
Alta	13.56	19.84	10.70
Molto alta	2.47	4.81	1.27

I risultati sono mostrati in Figura 4.1-5, dove in rosso si riportano le percentuali di edifici e in blu quelle delle strade che a livello comunale ricadono nelle classi di più alta esposizione. Per quanto riguarda le linee ferroviarie, la maggior parte dei comuni non ne è interessata, per cui l'esposizione non mostra significativi valori di percentuale di dissesto a livello comunale, ad eccezione della municipalità di Sant'Elia a Pianisi dove circa 80% della ferrovia (4300 m) ricade nelle classi più alte.

Dallo studio dei risultati si è osservato che numerose municipalità hanno più di un terzo delle loro strade e delle aree edificate nelle più alte classi di suscettibilità. Il numero delle municipalità con più del 30% di elementi a rischio ricadenti nelle più alte classi di suscettibilità è, rispettivamente, pari a 59 (strade), 42 (edifici), e 7 (ferrovie).

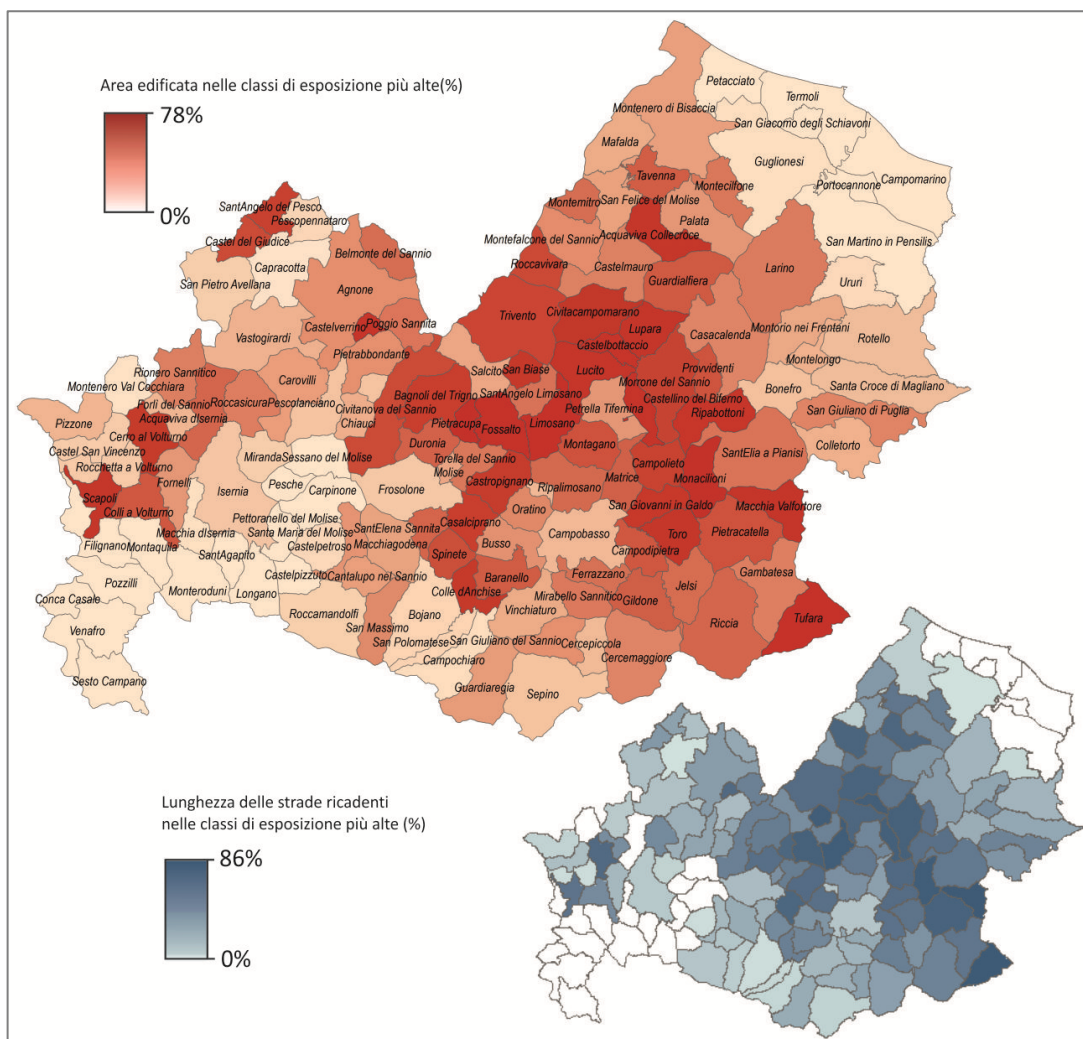


Figura 4.1-5 Percentuali degli edifici (in rosso) e delle strade (in blu) ricadenti nelle classi di esposizione alta e molto alta, su base comunale.

Inoltre alcune municipalità hanno più del 50% degli edifici e delle strade ricadenti nelle più alte classi di suscettibilità, con alcuni paesi come Castelbottaccio, Castellino del Biferno, Fossalto, Limosano, Monacilioni, Pietracupa e Tufara che presentano valori dal 60 al 70%. I comuni che hanno una percentuale maggiore del 30% di strade e edifici ricadenti nelle più alte classi di esposizione sono riportati nell'istogramma di Figura 4.1-6.

I valori di esposizione alla scala comunale sono stati correlati a quelli osservati per l'indice SMD. I vari indici per la determinazione dei termini che permettono il calcolo finale dello stato di malessere demografico (SMD), esplicitati nel paragrafo 3.1.4, sono frutto dell'elaborazione dei dati di popolazione derivanti dai censimenti ISTAT.

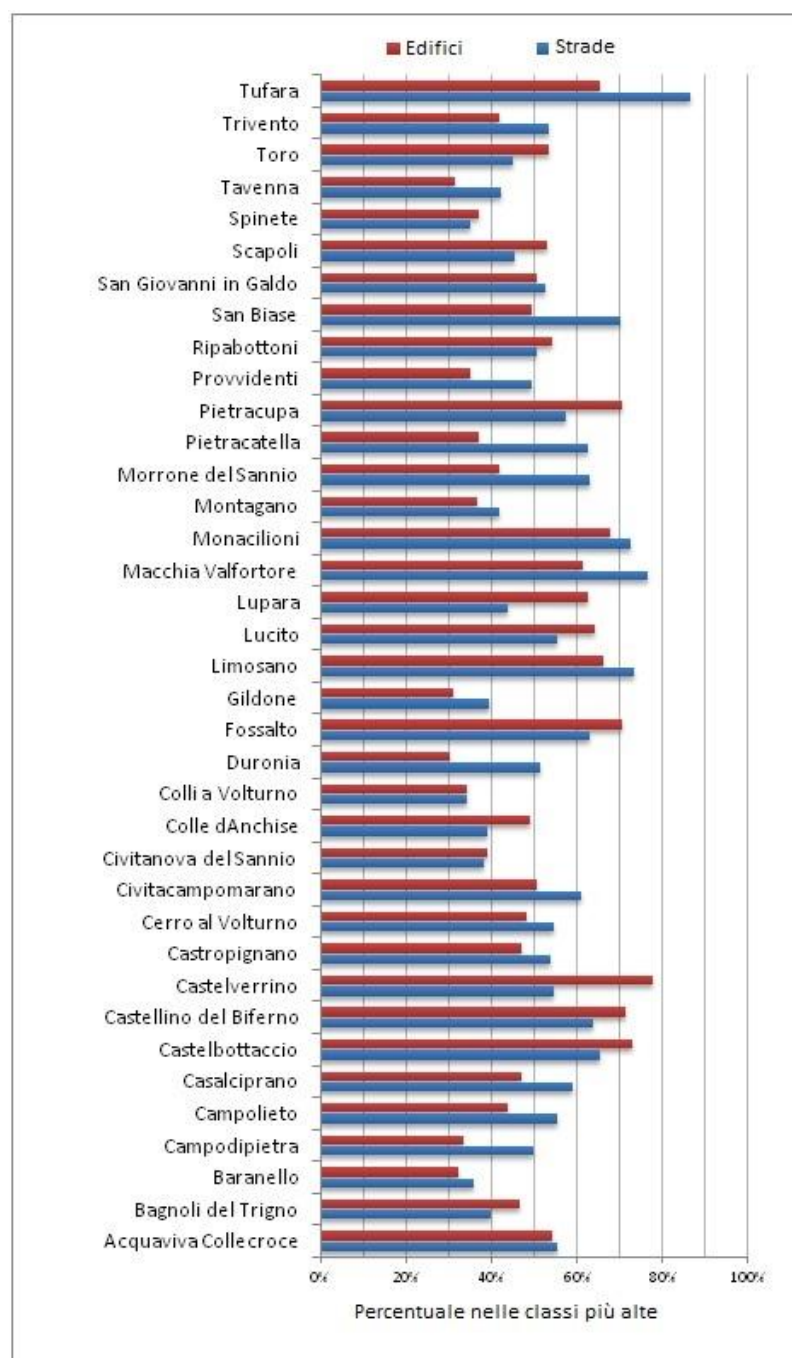


Figura 4.1-6 Comuni con percentuale maggiore del 30% di strade e edifici ricadenti nelle più alte classi di esposizione.

Per un più chiaro quadro di analisi, in Tabella 4.1-7 sono riportati i termini utili per la costruzione dell'indice SMD e la relativa classe di valutazione finale. In tabella per semplicità di esposizione vengono riportati solo i comuni ricadenti in classe “grave” e “gravissima”.

Tabella 4.1-7 Indici utilizzati per il calcolo dello stato di malessere demografico (SMD).

Denominazione del territorio	Variazione percentuale della popolazione nel periodo 1951-2011 (2011-1951)/1951 (VP)	cg1	Variazione percentuale della popolazione nel decennio 2001-2011 (2011-2001)/2001 (VPI)	cg2	Indice di eccedenza percentuale dei nati sui morti dal 2002 al 2011 (ESN)	Indice di vecchiaia - Popolazione di 65 anni e oltre per 100 abitanti di età 0-14 anni (IV) al 2011	Indice anziano per bambino - Popolazione di 65 anni e oltre per bambino con meno di 5 anni (AB)	Indice di dipendenza - Popolazione di 0-14 anni e di 65 anni e più per 100 abitanti di età 15-64 anni (ID)	Episodi di spopolamento nei 6 intervalli intercensuari (1951-2011) (SSI)	SVNP (SSI+cg1+cg2)	svnp1	ism	ism norm	Indice dello Stato di malessere demografico (SMD_2011)	Stato di salute della popolazione
Acquaviva Collecroce	-70,04	5	-15,75	4	-54,2	284,1	14,0	64,8	6	15	93,8	77,2	29,9	123,7	grave
Bonefro	-69,69	5	-18,42	4	-37,8	282,0	8,7	67,4	6	15	93,8	80,1	31,0	124,8	grave
Casalciprano	-65,87	5	-10,08	3	-49,5	461,0	13,5	67,4	6	14	87,5	123,1	47,7	135,2	grave
Castelbottaccio	-76,21	5	-17,30	4	-79,1	900,0	22,5	134,2	5	14	87,5	244,4	94,7	182,2	gravissima
Castelmauro	-67,31	5	-13,88	2	-59,2	467,7	17,5	78,6	6	13	81,3	126,2	48,9	130,2	grave
Civitacampomariano	-74,21	5	-33,28	5	-67,1	450,0	12,2	86,4	6	16	100,0	120,4	46,7	146,7	grave
Colletorto	-52,15	4	-15,64	4	-45,1	318,5	11,8	67,0	6	14	87,5	88,0	34,1	121,6	grave
Duronia	-80,89	5	-14,99	4	-73,2	650,0	30,3	95,0	6	15	93,8	175,5	68,0	161,8	grave
Lucito	-62,22	5	-23,46	5	-54,2	436,7	13,1	78,2	6	16	100,0	118,4	45,9	145,9	grave
Lupara	-72,54	5	-17,36	4	-51,0	406,0	18,5	88,8	6	15	93,8	115,6	44,8	138,5	grave
Macchia Valfortore	-66,61	5	-17,97	4	-59,7	634,1	17,3	94,1	6	15	93,8	171,5	66,5	160,2	grave
Molise	-67,40	5	-12,90	3	-65,9	371,4	52,0	68,8	6	14	87,5	106,6	41,3	128,8	grave
Monacilioni	-72,72	5	-18,68	4	-52,6	569,4	12,8	77,2	6	15	93,8	151,7	58,8	152,6	grave
Montelongo	-76,64	5	-21,63	5	-52,6	327,8	14,8	67,0	6	16	100,0	89,2	34,6	134,6	grave
Morrone del Sannio	-76,90	5	-14,40	3	-59,4	387,7	10,0	75,1	6	14	87,5	103,4	40,1	127,6	grave
Pietracupa	-77,67	5	-11,97	3	-74,6	566,7	28,3	78,1	6	14	87,5	149,6	58,0	145,5	grave
Provvidenti	-81,23	5	-26,51	5	-40,5	400,0	6,0	58,4	6	16	100,0	106,0	41,1	141,1	grave
Ripabottoni	-80,02	5	-19,17	4	-52,4	379,6	14,3	76,1	6	15	93,8	104,4	40,5	134,2	grave
San Biase	-81,59	5	-22,88	5	-73,8	927,3	20,4	117,7	6	16	100,0	247,9	96,1	196,1	gravissima
Tavenna	-63,68	5	-18,09	4	-65,1	595,0	19,8	104,8	6	15	93,8	163,6	63,4	157,2	grave
Bagnoli del Trigno	-78,14	5	-11,97	3	-67,5	422,7	12,7	80,8	6	14	87,5	112,2	43,5	131,0	grave
Capracotta	-73,81	5	-15,33	4	-52,2	334,5	12,2	62,4	6	15	93,8	89,2	34,6	128,3	grave
Castelverrino	-74,95	5	-4,62	1	-84,6	614,3	43,0	67,6	6	12	75,0	160,1	62,0	137,0	grave
Chiauci	-65,01	5	-3,25	1	-64,9	464,7	19,8	55,8	6	12	75,0	118,8	46,1	121,1	grave
Conca Casale	-61,37	5	-20,45	5	-57,4	615,4	16,0	76,9	6	16	100,0	162,7	63,1	163,1	gravissima
Filignano	-60,38	5	-8,86	2	-48,9	389,5	11,1	68,0	6	13	81,3	104,9	40,7	121,9	grave
Pescopennataro	-64,16	5	-22,48	5	-81,8	1009,1	37,0	68,5	6	16	100,0	258,2	100,1	200,1	gravissima
Pietrabbondante	-68,22	5	-14,05	3	-67,4	478,9	45,5	66,5	6	14	87,5	130,9	50,7	138,2	grave
Poggio Sannita	-70,88	5	-18,72	4	-53,1	497,0	11,9	109,9	6	15	93,8	141,4	54,8	148,6	grave
San Pietro Avellana	-68,19	5	-18,88	4	-48,1	308,8	11,7	76,6	6	15	93,8	87,3	33,8	127,6	grave
Sant'Angelo del Pesco	-63,96	5	-11,54	3	-41,9	378,1	9,3	71,2	6	14	87,5	104,2	40,4	127,9	grave
Sant'Elena Sannita	-79,02	5	-6,14	2	-64,3	538,9	16,2	79,3	6	13	81,3	142,5	55,2	136,5	grave
Sessano del Molise	-57,85	4	-19,74	4	-68,1	440,4	17,3	51,8	6	14	87,5	110,4	42,8	130,3	grave

L'indice SMD ha mostrato come solo 15 comuni siano inclusi nella categoria “buona” e 24 in quella “discreta”, mostrando quindi uno stato di malessere demografico e dinamiche di depopolamento non particolarmente preoccupanti. Invece ben 64 comuni ricadono nella classe “precaria”, 29 in quella “grave” e 4 nella classe “gravissima” (Tabella 4.1-8). La percentuale della distribuzione della popolazione in relazione all'indice SMD mostra come più del 31% di abitanti vive in comuni associati alle tre più alte classi (precaria, grave e gravissima); il 69% della popolazione, invece, rientra nelle classi buona e discreta (Tabella 4.1-8).

Tabella 4.1-8 Distribuzione delle municipalità e della popolazione nelle classi di SMD.

Classe SMD	Numero di municipalità nella classe	Popolazione nella classe	Popolazione nella classe (%)
Buona	15	145091	46.26
Discreta	24	71158	22.69
Precaria	64	77308	24.65
Grave	29	19031	6.07
Gravissima	4	1072	0.34

La discrepanza tra i valori percentuali di popolazione e di numero di comuni ricadenti in ogni classe è attribuibile al fatto che la distribuzione della popolazione non è naturalmente uniforme all'interno dei comuni. Infatti, gran parte della popolazione risiede nelle maggiori città (Campobasso, Isernia e Termoli), che sono quelle con il più basso valore di SMD, attribuite alla classe buona (vedi Figura 4.1-7). Tale informazione suggerisce anche una probabile migrazione di abitanti dai piccoli centri rurali verso i grandi centri, o verso regioni limitrofe, durante l'intervallo di analisi considerato.

I risultati ottenuti a scala comunale per la regione Molise vengono mostrati in Figura 4.1-7 che evidenzia come le aree più sofferenti in termini di SMD sono concentrate perlopiù in alcune porzioni del territorio, caratterizzate dall'aggregazione di due o più municipalità adiacenti, con lo stesso livello di SMD.

Inoltre mettendo in relazione i valori di SMD con quelli dell'esposizione precedentemente trattati, si può notare come la maggior parte dei comuni con alto SMD siano anche affetti da un'alta percentuale di elementi esposti. Questi gruppi di comuni sono localizzati nel settore centrale o in prossimità del confine nord-occidentale della regione, dove si hanno anche livelli più alti di suscettibilità da frana, e quindi di esposizione. Inoltre si può dedurre che comuni con alto grado di esposizione condividano anche uno specifico stato socio-economico, come un mercato del lavoro e relativa struttura economica basata principalmente su attività rurali e agricole tipiche dei centri minori della regione Molisana.

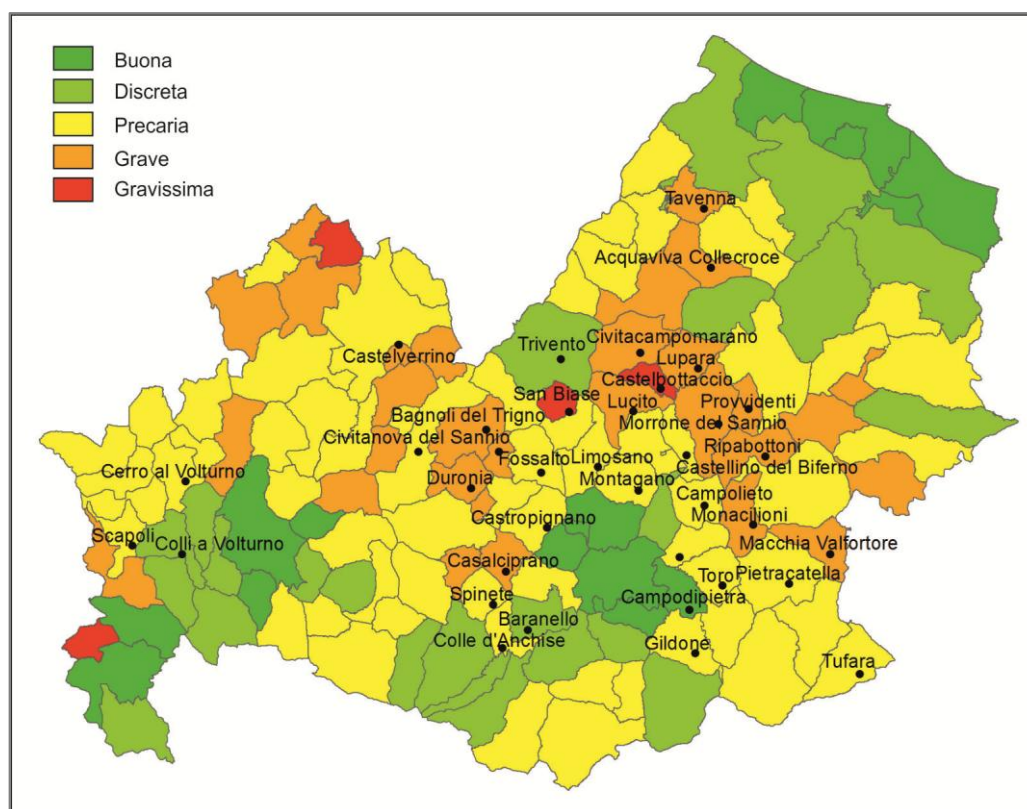


Figura 4.1-7 Distribuzione dei valori di SMD nei comuni molisani. Sono riportati i nomi dei soli comuni aventi più del 30% di strade e edifici ricadenti nelle più alte classi di esposizione.

Riassumendo, i comuni con più del 30% di edificato e strade ricadenti nelle classi di esposizione più alte (vedi Figura 4.1-6), mostrano valori di classe di SMD tra discreta e gravissima. In particolare, due di essi ricadono in classe “gravissima”, 15 in “grave”, 16 in “precara”, solo 3 in “discreta”, e 1 in “buona” (Campodipietra).

I risultati finora presentati forniscono un’indicazione rispetto alla diretta relazione tra dinamiche demografiche (spopolamento e stato di malessere) e le condizioni di instabilità idrogeologiche (fenomeni franosi). Sebbene i meccanismi collegati allo stato di malessere demografico della popolazione, siano guidati da dinamiche complesse che andrebbero investigate con maggiore dettaglio e tenendo in considerazione un numero di parametri molto più ampio, non si può escludere che alla luce delle osservazioni fatte, il rischio da frana possa essere associato con particolari stati di malessere demografico. Un simile risultato è stato osservato sia nella confinante regione Puglia, per un’area facente parte del Sub-Appennino Dauno (Pisano et al., 2016b), che a scala nazionale (Ferrara et al., 2015). E’ importante sottolineare come gli autori di quest’ultimo lavoro giungano a conclusioni simili a quelle presentate per l’area molisana, anche tenendo in considerazione un numero di parametri socio-economici molto più ampio.

Infine, è facilmente comprensibile come in aree rurali, tipiche dei piccoli centri di insediamento molisani, le conseguenze dei fenomeni franosi, quali ad esempio le frequenti

interruzioni di strade (Figura 4.1-8), e i danni a strutture abitative e agricole possono aver incentivato le dinamiche di depopolamento e sfavorito i possibili investimenti economici in attività come turismo e agricoltura.



Figura 4.1-8 Esempi di danni prodotti da frane a strade nell'area di studio.

4.2 Risultati ottenuti a scala di bacino

Nei seguenti paragrafi si presentano e descrivono i risultati ottenuti alla scala di bacino, andando ad investigare le relazioni esistenti fra i fenomeni franosi e le coperture del suolo su cui gli stessi si impostano.

Si descrivono inizialmente i principali cambiamenti di copertura del suolo, avvenuti in passato, per le 3 annate considerate in questo lavoro di ricerca (1954, 1981, 2007). Successivamente si presentano 3 scenari futuri di copertura del suolo, uno relativo al 2030 e due al 2050. Lo scenario 2030 e quello 2050a presentano modalità di cambiamento che rispecchiano gli andamenti definiti dalle mappature passate, mentre lo scenario 2050b prende in considerazione una estrema diminuzione delle aree boscate e delle aree a coltivo.

Si è provveduto quindi a realizzare delle mappe di suscettibilità da frana multi-temporali indagando come la variazione di copertura del suolo abbia influenzato la distribuzione della propensione al dissesto in passato. L'analisi delle variazioni passate ha permesso infine di definire dei pesi per ogni classe dei fattori predisponenti, che sono stati standardizzati e associati mediante una valutazione spaziale “multi-criterio” (vedi par. 3.2.5).

4.2.1 Mappe multi-temporali di copertura del suolo nel bacino del Rivo e stima dei principali cambiamenti

In Figura 4.2-1 sono riportate le mappe di copertura del suolo ottenute mediante la digitalizzazione degli orto-mosaici creati dai fotogrammi delle varie annate prescelte (vedi par. 3.2.2). L'analisi delle immagini mostrano come all'interno del bacino del Rivo vi siano

stati evidenti cambiamenti di copertura del suolo nell'arco dell'intervallo temporale preso in considerazione.

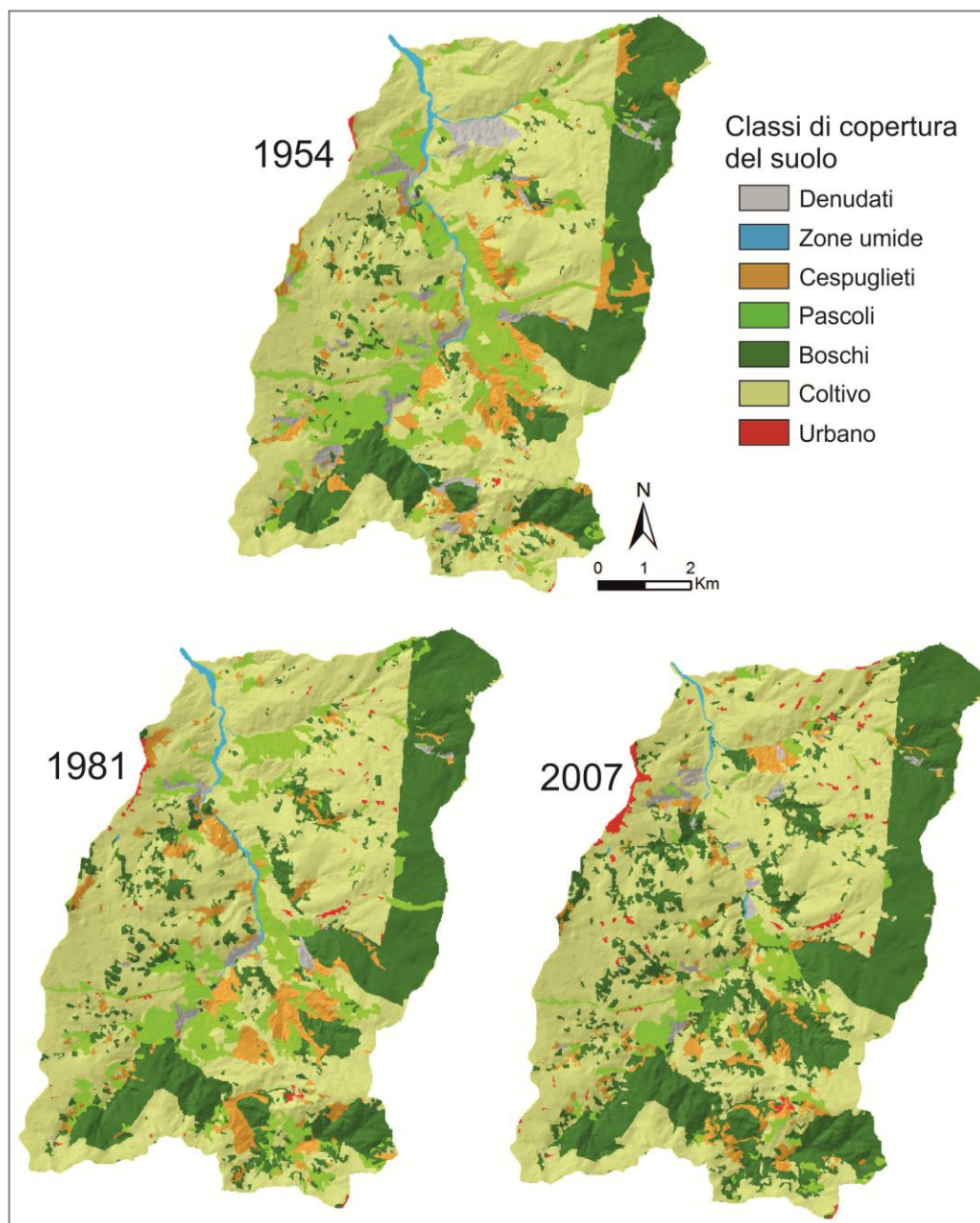


Figura 4.2-1 Mappe di copertura del suolo realizzate per gli anni 1954, 1981 e 2007.

In prima analisi è distinguibile come in tutte le annate analizzate la classe più abbondante risulti essere quella associata alle aree a coltivo, seguita dalle aree boscate e dalle aree a pascolo. La comparazione delle varie annate è più facilmente documentabile e riscontrabile attraverso l'istogramma e la relativa tabella riportata di seguito (Figura 4.2-2).

Nel 1954 le aree sottoposte a coltivo occupano circa il 53,5% dell'intera area, mentre la seconda classe più diffusa è quella delle aree boscate (circa il 21,2%). I pascoli, le aree a cespuglieto e i denudati occupano rispettivamente il 13,7%, il 7,2% e il 3,5%. Meno dell'1% sono invece le zone umide.

Facendo riferimento a tutto l'intervallo considerato, i maggiori cambiamenti avvenuti all'interno del bacino sono legati all'espansione delle aree boscate con una relativa diminuzione dei pascoli, delle aree a cespuglieto e dei denudati. Il relativo incremento dei boschi consiste in una percentuale che si attesta a più dell'11,5%, mentre le aree a pascolo e le aree denudate si riducono di circa due terzi. L'istogramma e la relativa tabella (Figura 4.2-2) evidenziano come l'incremento di aree boscate sia continuo in tutto l'arco di tempo analizzato (1954-2007), mentre la riduzione dei pascoli e dei cespuglieti sono più marcati nel secondo periodo analizzato (1981-2007). Le altre due classi che subiscono un seppur lieve incremento sono le aree sottoposte a coltivo e le urbanizzate. Le prime passano dal 53,5% al 55,4%, mentre le seconde passano dallo 0,1% a più dell'1% dell'anno 2007.

Le altre classi subiscono invece una sostanziale diminuzione, le aree a pascolo passano dal 14% nel 1954 al 11% nel 1981, fino ad arrivare a meno del 5% nel 2007. Le aree occupate da cespuglieti subiscono una costante lieve diminuzione passando dal 7% al 4%, così come le zone umide dallo 0,7% al 0,3%, mentre le aree denudate diminuiscono solo nel primo periodo (1954-1981), passando dal 3% al 1%, e rimangono costanti nel secondo (1981-2007).

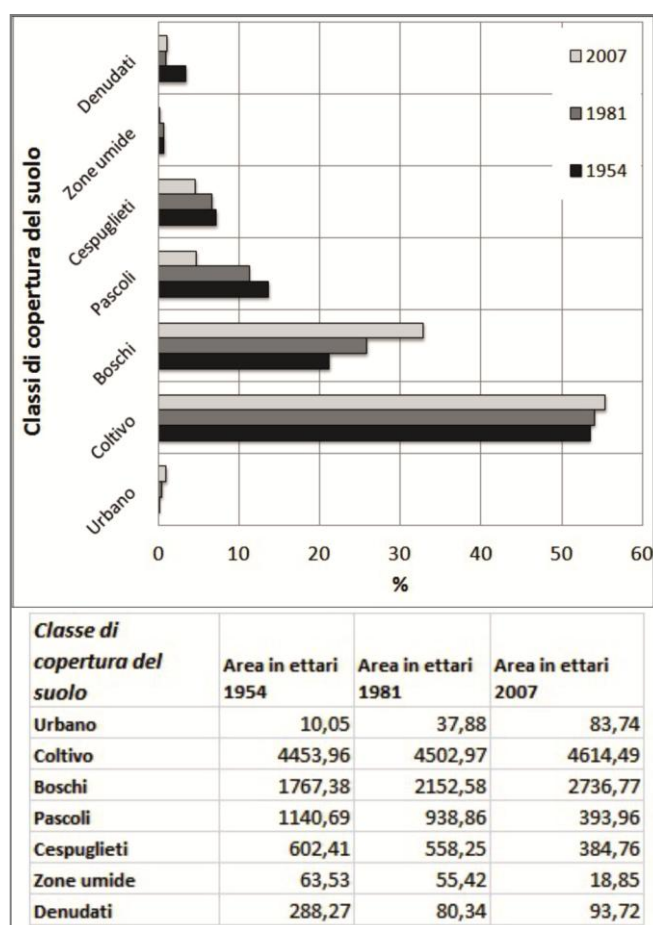


Figura 4.2-2 L'istogramma mostra le percentuali di copertura delle varie classi per le annate analizzate. Nella tabella in basso si riportano le estensioni in ettari.

Analizzando, invece, le matrici di transizioni (Tabella 4.2-1 e Tabella 4.2-2) per i due periodi analizzati (1954-1981 e 1981-2007), si possono notare come i maggiori cambiamenti di copertura del suolo risultino i seguenti:

- periodo 1 (1954-1981): pascolo → coltivo; cespuglieti → aree boscate; coltivo → pascolo.
- periodo 2 (1981-2007): cespuglieti → aree boscate; pascolo → coltivo; pascolo → aree boscate.

Tabella 4.2-1 Matrice di transizione dei cambiamenti di copertura del suolo nel periodo 1 (1954-1981). Le celle diagonali in grassetto rappresentano gli ettari stabili in ogni classe, i valori in rosso rappresentano le classi con i maggiori cambiamenti.

Periodo di transizione 1954-->1981 (valori in ettari)							
1954	1981						
	Urbano	Coltivo	Boschi	Pascolo	Cespuglieti	Zone Umide	Denudati
Urbano	9,8	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Coltivo	26,7	3883,6	131,0	274,1	130,1	6,5	1,8
Boschi	0,2	34,1	1653,5	12,7	65,1	0,1	1,8
Pascolo	4,2	485,3	50,4	454,2	121,3	5,8	19,6
Cespuglieti	0,4	49,4	287,5	75,8	184,3	0,5	4,4
Zone Umide	0,0	16,0	1,9	1,2	0,7	42,2	1,5
Denudati	0,2	33,3	25,9	120,9	56,4	0,5	51,2

Tabella 4.2-2 Matrice di transizione dei cambiamenti di copertura del suolo nel periodo 2 (1981-2007). Le celle diagonali in grassetto rappresentano gli ettari stabili in ogni classe, i valori in rosso rappresentano le classi con i maggiori cambiamenti.

Periodo di transizione 1981-->2007 (valori in ettari)							
1981	2007						
	Urbano	Coltivo	Boschi	Pascolo	Cespuglieti	Zone Umide	Denudati
Urbano	37,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
Coltivo	44,6	4103,2	162,1	94,1	73,7	2,5	22,9
Boschi	2,9	74,7	2054,9	3,7	14,0	0,0	2,3
Pascolo	1,1	302,9	157,4	246,8	191,1	0,0	39,5
Cespuglieti	2,6	95,8	348,0	19,5	91,5	0,0	0,9
Zone Umide	0,0	27,8	5,5	1,0	2,4	16,3	2,4
Denudati	0,0	5,6	8,7	28,7	11,6	0,0	25,7

La matrice di transizione (Tabella 4.2-3) rappresentante tutto il periodo analizzato (1954-2007), mostra come i maggiori cambiamenti all'interno del bacino siano avvenuti per il passaggio da pascolo a coltivo, e il passaggio tra le classi di cespuglieti, coltivo e pascolo che si trasformano in aree boscate.

Tabella 4.2-3 Matrice di transizione dei cambiamenti di copertura del suolo nel periodo complessivo (1954-2007). Le celle diagonali in grassetto rappresentano gli ettari stabili in ogni classe, i valori in rosso rappresentano le classi con i maggiori cambiamenti.

Periodo di transizione 1954->2007 (valori in ettari)							
1954	2007						Zone Umide
	Urbano	Coltivo	Boschi	Pascolo	Cespuglieti	Denudati	
Urbano	9,8	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
Coltivo	67,6	3884,0	282,7	111,1	101,5	0,8	6,3
Boschi	0,5	34,5	1721,5	3,4	7,4	0,0	0,1
Pascolo	5,8	559,5	169,9	231,4	127,3	0,2	46,6
Cespuglieti	0,7	58,0	480,9	10,3	52,5	0,0	0,0
Zone Umide	0,2	30,6	8,4	1,8	2,5	17,9	2,0
Denudati	0,2	46,8	73,3	35,9	93,5	0,0	38,6

L'analisi del coefficiente dell'indice di permanenza K (Figura 4.2-3) indica che per l'intervallo completo di analisi, le aree boscate, le aree a coltivo e le aree urbanizzate sono le più stabili componenti del paesaggio, mentre il pascolo, i cespuglieti e i denudati sono le meno stabili. Nel dettaglio si può notare come negli intervalli minori (1954-1981 e 1981-2003) i valori di persistenza siano molto simili, con una diminuzione dei valori nel secondo periodo solo per le classi cespuglieto e pascolo. Un'altra evidente differenza si ha con i valori delle zone umide che dimezzano il loro coefficiente di persistenza, probabilmente a causa del restringimento delle zone di alveo attivo, le quali vengono occupate principalmente da aree a coltivo.

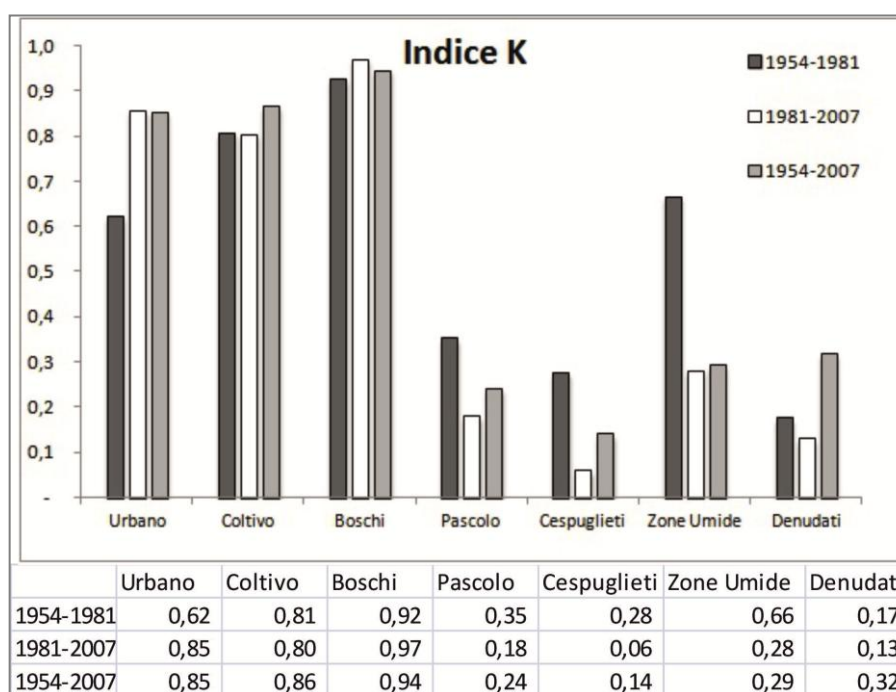


Figura 4.2-3 Istogramma e valori dell'indice di permanenza K.

Le dinamiche di variazione di copertura del suolo osservate alla scala di bacino confermano in gran parte le dinamiche descritte a scala più vasta in aree montuose-collinari del Mediterraneo italiano (Falcucci et al., 2007; Brachetti et al., 2012). Come descritto precedentemente, tra 1954 e 2007 si assiste ad una diminuzione dei pascoli e dei cespuglieti, sostituiti da un intenso processo di rimboschimento. La sola parziale differenza risiede nella quasi stazionarietà delle aree adibite a coltivo. Tale fenomeno è stato già osservato e discusso a scala nazionale da Falcucci et al. (2007), che documentano una persistenza per il periodo 1960-2000 delle aree coltivate mediante tecniche tradizionali a stampo rurale. Molti studi condotti su zone montuose collinari delle regioni mediterranee e sub-mediterranee mostrano, per periodi di analisi simili, i seguenti effetti: l'espansione delle aree boscate (Carranza et al., 2001; Lasanta-Martinez et al., 2005), l'espansione di cespuglieti (Romero-Calcerrada e Perry, 2004) o in alcuni casi entrambi (Torta, 2004; Rocchini et al., 2006; Pueyo e Begueria, 2007). In accordo con Brachetti et al. (2012), ma in contrasto con parte della bibliografia sopracitata, nell'area qui analizzata non si riconosce nessuna espansione delle aree a cespuglieto. Come si evince dalle matrici di transizione sopra presentate, infatti, le aree a cespuglieto si trasformano in gran parte in boschi (probabilmente per una naturale crescita della vegetazione).

4.2.2 Scenari futuri di copertura del suolo e stima dei principali cambiamenti

In questo paragrafo si descrivono le simulazioni future della copertura del suolo realizzate per il bacino del Rivo. Come su accennato, sono state realizzate tre mappe, una relativa al 2030 e due relative la 2050. La 2050a segue gli andamenti definiti in passato, che sono alla base della proiezione futura, mentre la 2050b prende in considerazione una estrema diminuzione del bosco e delle aree a coltivo considerando un aumento delle temperature e un cambio nel regime pluviometrico, con conseguente minore disponibilità di risorse per l'attività agricola. Le mappe realizzate sono presentate in Figura 4.2-4, e un quadro generale delle estensioni delle singole classi di copertura del suolo è riportato in Figura 4.2-5. Per una più immediata comprensione dei cambiamenti modellati per il futuro, in Figura 4.2-5 si riportano anche i valori della reale copertura del suolo per l'annata 2007.

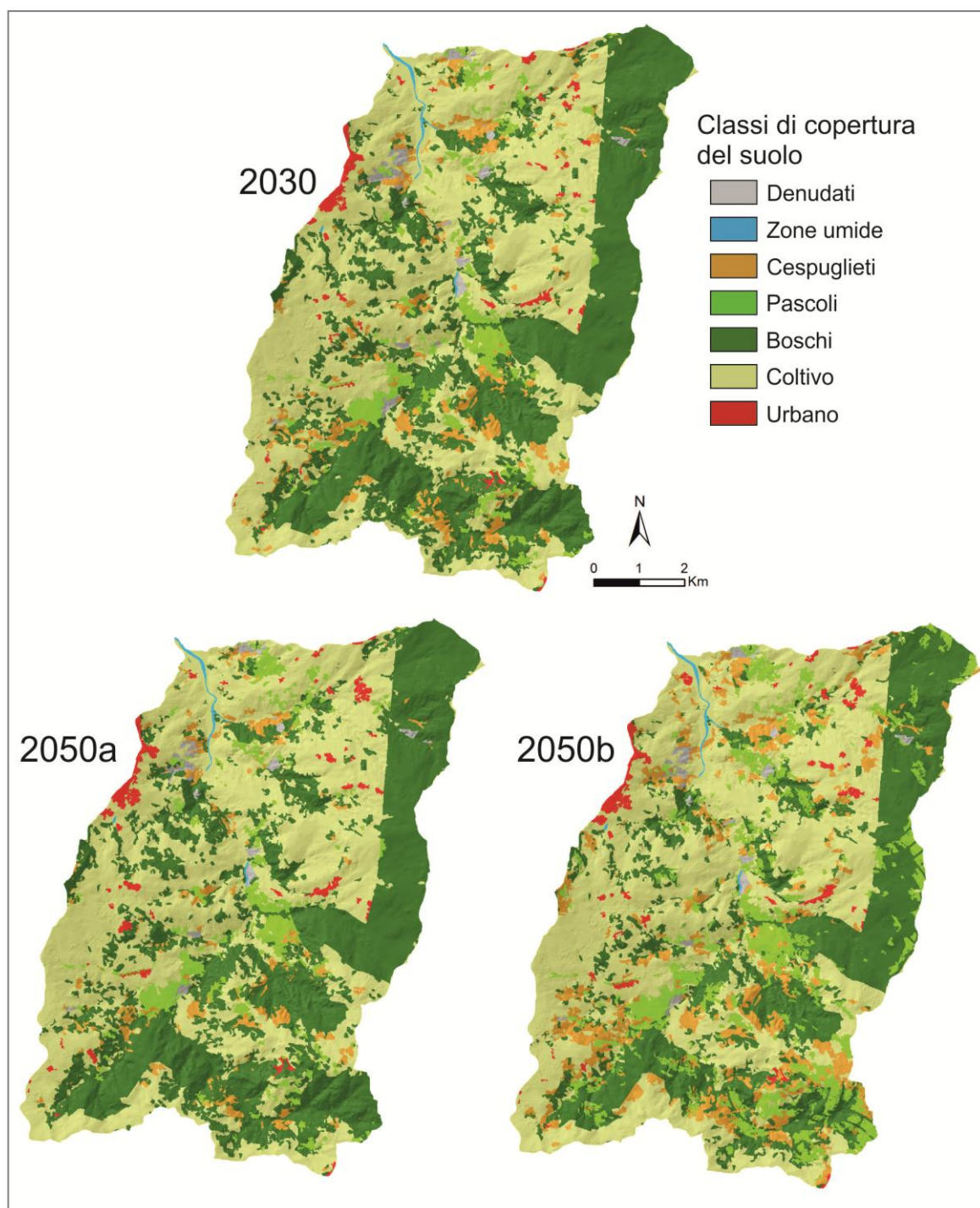


Figura 4.2-4 Scenari futuri di copertura del suolo.

Nello specifico si osserva come vi sia un generale aumento delle aree urbanizzate che passano da poco più dell'1% per il 2007 all'1,35% per il 2030 e 1,6 % circa per entrambe le simulazioni per il 2050 (vedi Figura 4.2-5). Per quanto riguarda le aree poste a coltivo è stato simulato un generale trend di diminuzione delle aree, sia per quanto riguarda il 2030, con un passaggio dal 55% per il 2007 al 48% per il 2030. Per il 2050 ci si attesta su valori simili al 2030, con il 48,6% nel modello 2050a, e 47,5% per il modello 2050b. Per quel che riguarda le aree boscate, seguendo i trend passati, il 2030 mostra un aumento di circa il 6,5%, passando

da 32,9 a 39,3%. I due modelli per il 2050 mostrano invece una divergenza totale in questa classe, con il modello 2050a che aumenta leggermente rispetto al 2030 raggiungendo il 40,3% dell'estensione, mentre il modello 2050b mostra una significativa diminuzione passando al 29% dell'estensione totale. Per quanto riguarda le aree a pascolo, queste rimangono pressoché costanti al passaggio tra 2007-2030-2050a (variazione progressiva da 4,7 a 4,9, a 5%). Nel modello 2050b si ha invece un raddoppio delle coperture con un'estensione che copre circa l'11,04% dell'intero territorio. Le aree a cespuglieto mostrano un aumento per il 2030 con passaggio da 4,6 a 5,3%, mentre assumono caratteristiche differenti per i due modelli 2050, nel 2050a la copertura si attesta al 3,4% mentre il 2050b evidenzia un aumento fino al 9,7%. Le restanti classi di copertura del suolo (zone umide e denudati), vengono mantenute quasi costanti in tutti i modelli.

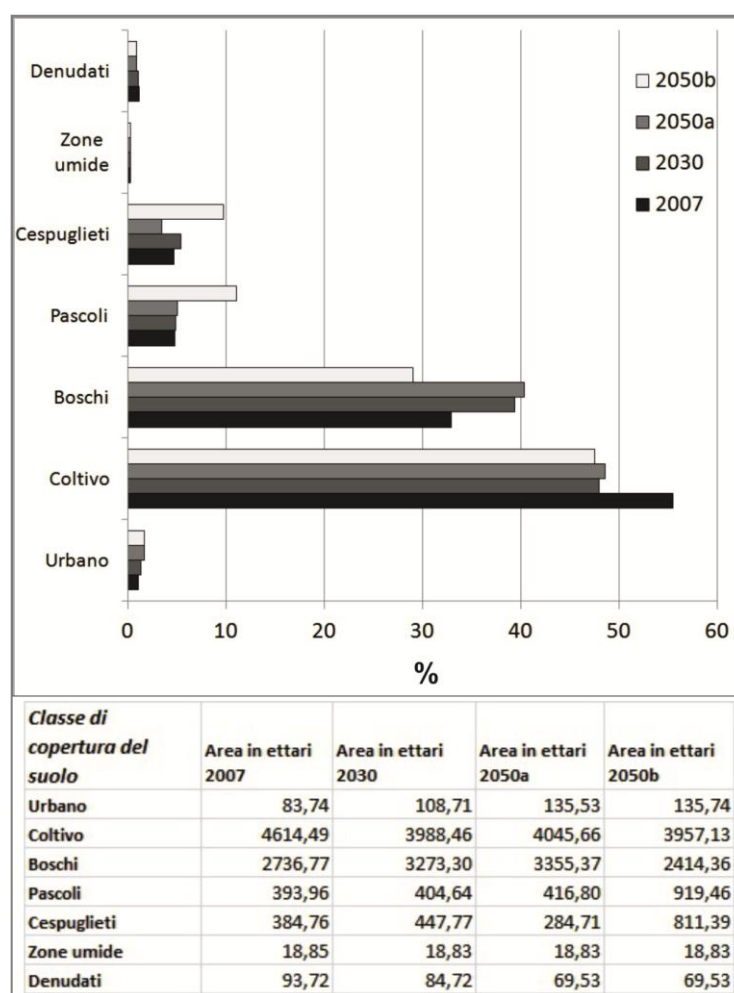


Figura 4.2-5 L'istogramma riporta le percentuali di copertura delle varie classi per le annate degli scenari futuri. Nella tabella in basso sono invece riportate le estensioni in ettari.

Analizzando le matrici di transizione create utilizzando le combinazioni 2007-2030, 2007-2050a, e 2007-2050b, si può evincere quali siano i maggiori cambiamenti avvenuti tra le classi. Dalla Tabella 4.2-4 si deduce che al passaggio tra 2007 e 2030, i maggiori

cambiamenti avvengono al passaggio tra aree a coltivo e aree boscate, aree a coltivo e cespuglieti, e subordinatamente tra cespuglieti e boschi.

Tabella 4.2-4 Matrice di transizione dei cambiamenti di copertura del suolo nel periodo compreso tra 2007 e lo scenario al 2030. Le celle diagonali in grassetto rappresentano gli ettari stabili in ogni classe, i valori in rosso rappresentano le classi con i maggiori cambiamenti.

Periodo di transizione 2007-->2030 (valori in ettari)							
2007	2030						Zone Umide Denudati
	Urbano	Coltivo	Boschi	Pascolo	Cespuglieti		
Urbano	82,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Coltivo	25,8	3918,5	369,7	98,1	203,1	0,0	0,0
Boschi	0,0	17,0	2719,2	0,5	0,3	0,0	0,0
Pascolo	0,8	48,0	27,6	299,6	9,2	0,0	0,0
Cespuglieti	0,0	4,7	154,4	2,0	223,8	0,0	0,0
Zone Umide	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,8	0,0
Denudati	0,0	0,3	2,4	4,5	11,3	0,0	84,7

La matrice di transizione realizzata tra la copertura del suolo del 2007 e lo scenario 2050a mostra i maggiori cambiamenti tra coltivo e bosco, cespuglieto e bosco, e subordinatamente coltivo e pascolo, rispecchiando in parte il trend più breve descritto in precedenza (Tabella 4.2-5).

Tabella 4.2-5 Matrice di transizione dei cambiamenti di copertura del suolo nel periodo compreso tra il 2007 e lo scenario 2050a. Le celle diagonali in grassetto rappresentano gli ettari stabili in ogni classe, i valori in rosso rappresentano le classi con i maggiori cambiamenti.

Periodo di transizione 2007-->2050a (valori in ettari)							
2007	2050a						Zone Umide Denudati
	Urbano	Coltivo	Boschi	Pascolo	Cespuglieti		
Urbano	82,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Coltivo	51,7	3932,7	367,1	154,0	109,7	0,0	0,0
Boschi	0,0	32,5	2702,1	1,0	1,3	0,0	0,0
Pascolo	1,7	65,2	50,2	251,3	16,9	0,0	0,0
Cespuglieti	0,0	14,2	222,0	2,5	146,2	0,0	0,0
Zone Umide	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,8	0,0
Denudati	0,0	1,1	14,0	7,9	10,6	0,0	69,5

L'ultima matrice di transizione (Tabella 4.2-6) mette in relazione l'anno 2007 con lo scenario definito 2050b, che mostra una perdita di aree a coltivo a favore di aree a pascolo e cespuglieto. L'altro passaggio più evidente si ha tra le aree boscate a favore delle aree a pascolo e delle aree a coltivo.

Tabella 4.2-6 Matrice di transizione dei cambiamenti di copertura del suolo avvenuto nel periodo compreso tra il 2007 e lo scenario al 2050b. Le celle diagonali in grassetto rappresentano gli ettari stabili in ogni classe, i valori in rosso rappresentano le classi con i maggiori cambiamenti

Periodo di transizione 2007-->2050b (valori in ettari)							
2050b							
2007	Urbano	Coltivo	Boschi	Pascolo	Cespuglieti	Zone Umide	Denudati
Urbano	82,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Coltivo	50,9	3822,1	47,1	265,2	429,9	0,0	0,0
Boschi	0,0	50,9	2309,4	351,4	25,3	0,0	0,0
Pascolo	2,7	68,1	2,2	286,3	26,0	0,0	0,0
Cespuglieti	0,0	13,6	53,1	9,5	308,7	0,0	0,0
Zone Umide	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,8	0,0
Denudati	0,0	2,4	2,6	7,1	21,5	0,0	69,5

4.2.3 Analisi delle variazioni di franosità e stima dei principali cambiamenti

Uno dei principali risultati del lavoro qui presentato consiste in un inventario multi-temporale dei fenomeni franosi per il bacino del Rivo, ottenuto mediante mappatura effettuata attraverso interpretazione fotogrammetrica digitale, realizzata seguendo le modalità descritte nel paragrafo 3.2.4. Si presentano pertanto qui di seguito i fenomeni mappati, e si sintetizzano le loro principali caratteristiche, quali la distribuzione all'interno del bacino nelle diverse annate e per le diverse tipologie, nonché la media delle dimensioni e la *Frequency Ratio* (FR) (vedi par. 3.2.5), calcolata sulle sole aree di distacco, rispetto ai principali fattori geo-ambientali che costituiscono i fattori predisponenti per l'analisi di suscettibilità successiva. Tali dati verranno, per semplicità di esposizione, presentati divisi per annate (1954, 1981, 2007), ed in ultimo si discuteranno i principali cambiamenti osservati nei diversi intervalli di tempo.

• 1954

I fenomeni franosi riconosciuti nella prima annata analizzata sono presentati in Figura 4.2-6. Essi sono distribuiti in maniera per lo più omogenea all'interno del bacino, con maggiore densità lungo i fianchi delle principali aste fluviali. L'area del bacino occupata da frane equivale al 12,70% dell'area totale; in Tabella 4.2-7 è riportato il numero di fenomeni franosi distinti per tipologia di movimento, da cui si evince come i fenomeni complessi siano quelli maggiormente riconosciuti, che occupano la porzione maggiore di area percentuale (52,70%) rispetto a tutta l'area in frana. Questo tipo di movimento rappresenta anche la tipologia con area media maggiore, in quanto caratterizzati da più fenomeni non facilmente distinguibili singolarmente.

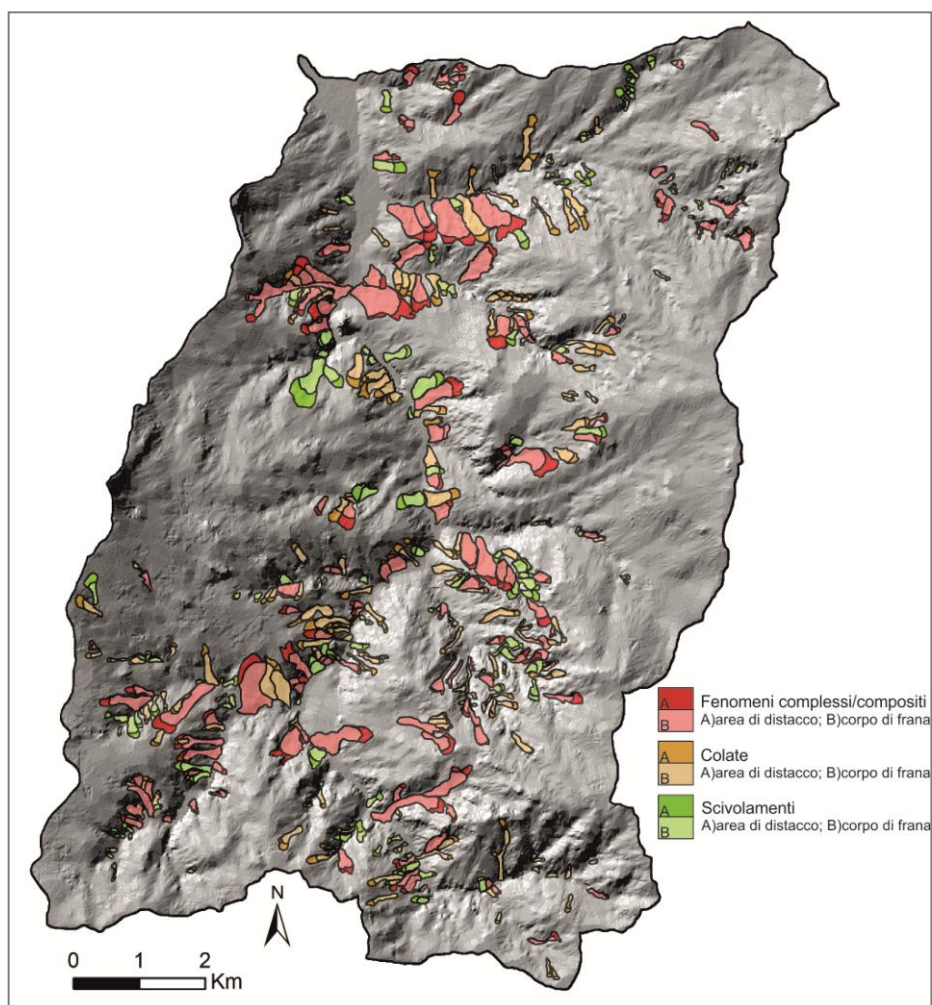


Figura 4.2-6 Mappa inventario delle frane per l'anno 1954.

Tabella 4.2-7 Numero di frane, area occupata (in km² ed in %), ed area media dei fenomeni franosi mappati per l'anno 1954.

Tipo di frana	Numero	Area 1954 (km ²)	Area media (km ²)	% area per tipo di frana
Complessi/compositi	251	5,53	2,20E-02	52,30
Colate	157	3,06	1,95E-02	28,93
Scivolamenti	119	1,99	1,67E-02	18,77
Numero e area totale in frana	527	10,57	2,01E-02	
Totale area del bacino		83,26		
% in frana del bacino		12,70		

Tabella 4.2-8 Valori di Frequency Ratio ottenuti per i principali parametri geo-ambientali per l'anno 1954.

Fattore predisponente	Classe	Numero di pixel nella classe (ATc)	Numero di pixel in frana nella classe (AFc)	Frequency Ratio (AFc/AFt)/(ATc/ATs)
Distanza dalle strade (m)	50	405708	6152	0,47
	100	340064	9737	0,90
	150	286795	8113	0,89
	>=150	2298002	82323	1,12
Copertura del suolo	Zone urbane	4007	0	0,00
	Coltivo	1781525	38482	0,68

	Aree boscate	706578	7064	0,31
	Pascoli	456753	32954	2,26
	Cespuglieti	240959	13851	1,80
	Zone Umide	25392	0	0,00
	Zone denudate	115316	13974	3,80
Litologia	A1	138188	4815	1,09
	AV	1937498	70600	1,14
	B	32067	0	0,00
	FTU	329881	5209	0,49
	MRD	137873	926	0,21
	SBO	216574	6378	0,92
	STG	64617	100	0,05
	TFL	473871	18297	1,21
Pendenza (°)	0-6,3	601148	5515	0,29
	6,3-12,7	1555123	36047	0,73
	13-19,0	840342	42527	1,59
	19,0-25,4	243357	15257	1,96
	25,4-31,7	64722	5054	2,45
	31,7-38,1	15709	1200	2,39
	38,1-44,4	6580	518	2,47
	44,4-50,8	2452	175	2,24
	50,8-57,1	1061	32	0,94
	57,1-63,4	75	7	2,92
Esposizione	flat	146910	4625	0,99
	Northeast	375376	14135	1,18
	East	356260	11667	1,03
	Southeast	267196	10283	1,21
	South	308562	9527	0,97
	Southwest	415218	10249	0,77
	West	565827	15259	0,84
	Northwest	488926	16345	1,05
	North	406294	14235	1,10
Internal relief (m/ha)	0-11,3	288229	487	0,05
	11,3-22,6	1451807	24940	0,54
	22,6-33,9	1147208	48619	1,33
	33,9-45,2	342778	23401	2,14
	45,2-56,5	83691	7521	2,81
	56,5-67,8	11533	1117	3,03
	67,8-79,13	3244	108	1,04
	79,13-90,4	1466	132	2,82
	90,4-101,7	445	0	0,00
	102-113	168	0	0,00
Altitudine (m)	241-314	105823	191	0,06
	314-387	187897	8574	1,43
	387-460	265464	17878	2,11
	460-533	325765	17408	1,67
	533-606	467317	20971	1,41
	606-679	612072	20804	1,06
	679-752	699002	15487	0,69
	752-825	411390	4408	0,34
	825-899	205795	604	0,09
	899-972	50044	0	0,00
ATs		330569		
AFt		106325		

L'analisi delle frequenze (FR) mostra i valori delle aree affette da frana (in termini di numero di pixel) in ogni classe dei principali fattori geo-ambientali; tali valori sono stati calcolati partendo dalle mappe raster, utilizzando la formula descritta nel paragrafo 3.2-5.

In Tabella 4.2-8 si riportano in rosso i valori maggiori di FR indicanti una maggiore propensione al dissesto, che si individuano all'interno delle classi centrali dei singoli fattori predisponenti quali pendenza ed *internal relief*. Alti valori si riscontrano anche in classi di copertura del suolo quali pascolo, cespuglieti e denudati, con quest'ultimo che ha in assoluto il valore maggiore.

• 1981

Nella seconda annata analizzata (1981) le frane mappate (Figura 4.2-7) risultano essere minori sia nel numero totale che nell'estensione, che copre circa il 9,5% dell'intero bacino. Rispetto al 1954 il numero percentuale di fenomeni complessi risulta maggiore rispetto al totale (68,7%) con un'estensione areale media superiore rispetto al 1954 (Tabella 4.2-9).

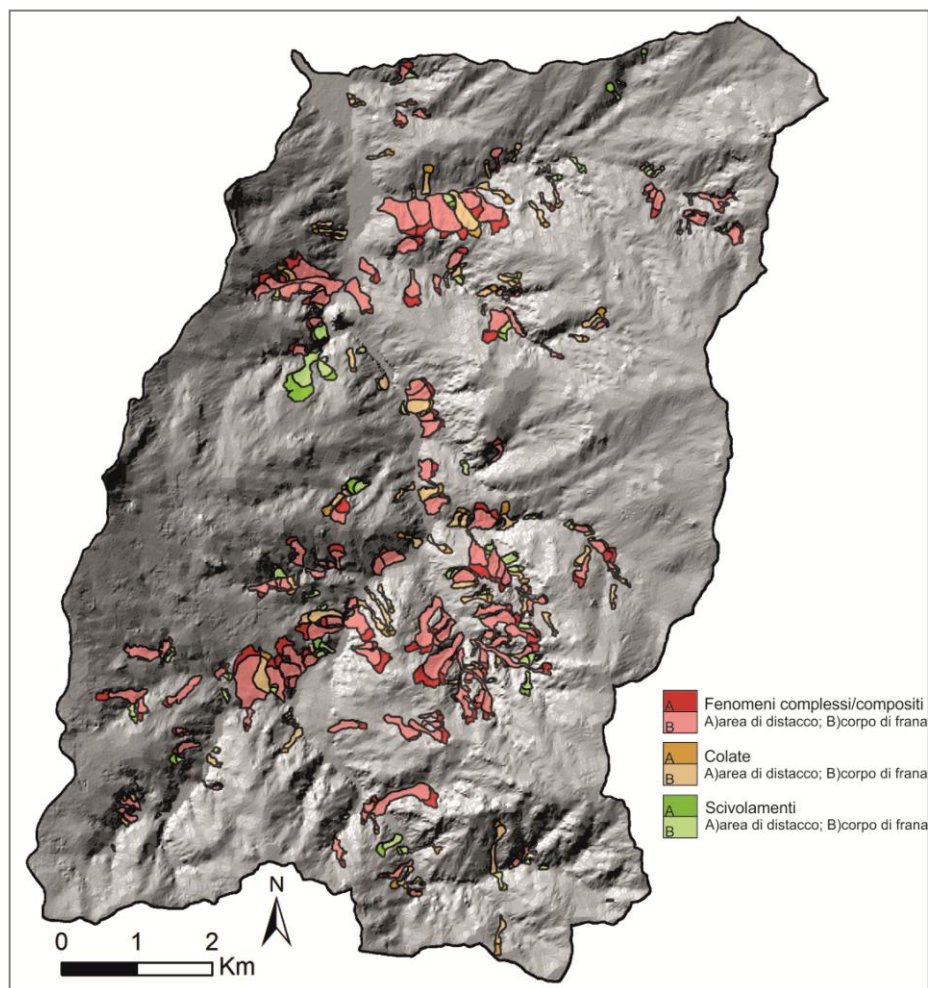


Figura 4.2-7 Mappa inventario delle frane per l'anno 1981.

Tabella 4.2-9 Numero di frane, area occupata (in km² ed in %), ed area media dei fenomeni franosi mappati per l'anno 1981.

Tipo di frana	Numero	Area 1981 (km ²)	Area media (Km ²)	% area per tipo di frana
Complessi/compositi	157	5,42	3,45E-02	68,72
Colate	94	1,58	1,68E-02	20,01
Scivolamenti	59	0,89	1,50E-02	11,27
Numero e area totale in frana	310	7,88	2,54E-02	
Totale area del bacino		83,26		
% in frana del bacino		9,46		

Ciò si può attribuire al fatto che i fenomeni franosi più grandi continuano ad evolvere coinvolgendo nuove porzioni attigue di territorio, mentre una forte diminuzione si ha nel numero delle frane di tipo colata e scivolamento.

Tabella 4.2-10 Valori di Frequency Ratio ottenuti per i principali parametri geo-ambientali per l'anno 1981.

Fattore predisponente	Classe	Numero di pixel nella classe (ATc)	Numero di pixel in frana nella classe (AFc)	Frequency Ratio (AFc/ATf)/(ATc/ATs)
Distanza dalle strade (m)	50	570163	4598	0,33
	100	460124	8086	0,73
	150	374964	9698	1,07
	>=150	1925318	58256	1,25
Copertura del suolo	Zone urbane	15140	8	0,02
	Coltivo	1801227	14901	0,34
	Aree boscate	861033	8916	0,43
	Pascoli	375553	37059	4,08
	Cespuglieti	223346	16959	3,14
	Zone Umide	22158	0	0,00
	Zone denudate	32112	2795	3,60
Litologia	A1	138188	4317	1,29
	AV	1937498	56888	1,21
	B	32067	0	0,00
	FTU	329881	5355	0,67
	MRD	137873	896	0,27
	SBO	216574	5302	1,01
	STG	64617	220	0,14
	TFL	473871	7660	0,67
Pendenza (°)	0-6,3	601148	3150	0,22
	6,3-12,7	1555123	23454	0,62
	13-19,0	840342	34069	1,67
	19,0-25,4	243357	14132	2,40
	25,4-31,7	64722	4173	2,66
	31,7-38,1	15709	1050	2,76
	38,1-44,4	6580	452	2,84
	44,4-50,8	2452	133	2,24
	50,8-57,1	1061	25	0,97
	57,1-63,4	75	0	0,00
Esposizione	flat	146910	3993	1,12
	Northeast	375376	9293	1,02
	East	356260	6858	0,80
	Southeast	267196	8291	1,28

	South	308562	8123	1,09
	Southwest	415218	8797	0,88
	West	565827	10548	0,77
	Northwest	488926	11923	1,01
	North	406294	12812	1,30
Internal relief (m/ha)	0-11,3	288229	227	0,03
	11,3-22,6	1451807	13372	0,38
	22,6-33,9	1147208	38136	1,37
	33,9-45,2	342778	21354	2,57
	45,2-56,5	83691	6361	3,14
	56,5-67,8	11533	1183	4,24
	67,8-79,13	3244	5	0,06
	79,13-90,4	1466	0	0,00
	90,4-101,7	445	0	0,00
	101,7-113,04	168	0	0,00
Altitudine (m)	241-314	105823	325	0,13
	314-387	187897	7058	1,55
	387-460	265464	13817	2,15
	460-533	325765	12581	1,60
	533-606	467317	16893	1,49
	606-679	612072	16891	1,14
	679-752	699002	11634	0,69
	752-825	411390	1369	0,14
	825-899	205795	70	0,01
	899-972	50044	0	0,00
ATs		3330569		
Aft		80638		

La FR per il 1981 (Tabella 4.2-10) mostra valori più alti nelle medesime classi rispetto al 1954: in particolare, si osservano alti valori nelle classi centrali di pendenza ed *internal relief*, mentre per la copertura del suolo si hanno valori maggiori per le classi pascoli e cespuglieti.

- **2007**

Nel 2007 l'estensione delle frane mappate (Figura 4.2-8) è pressoché costante rispetto al 1981. Anche in questo caso i fenomeni complessi coprono la percentuale di area maggiore, seguiti da colate e scivolamenti (Tabella 4.2-11).

Tabella 4.2-11 Numero di frane, area occupata (in km² ed in %), ed area media dei fenomeni franosi mappati per l'anno 2007.

Tipo di frana	Numero	Area 2007	Area media (Km ²)	% area per tipo di frana
Complessi/compositi	163	4,45	2,73E-02	61,80
Colate	149	2,09	1,40E-02	29,00
Scivolamenti	53	0,41	7,69E-03	5,66
Numero e area totale in frana	365	7,19	1,97E-02	
Totale area del bacino		83,26		
% in frana del bacino		8,64		

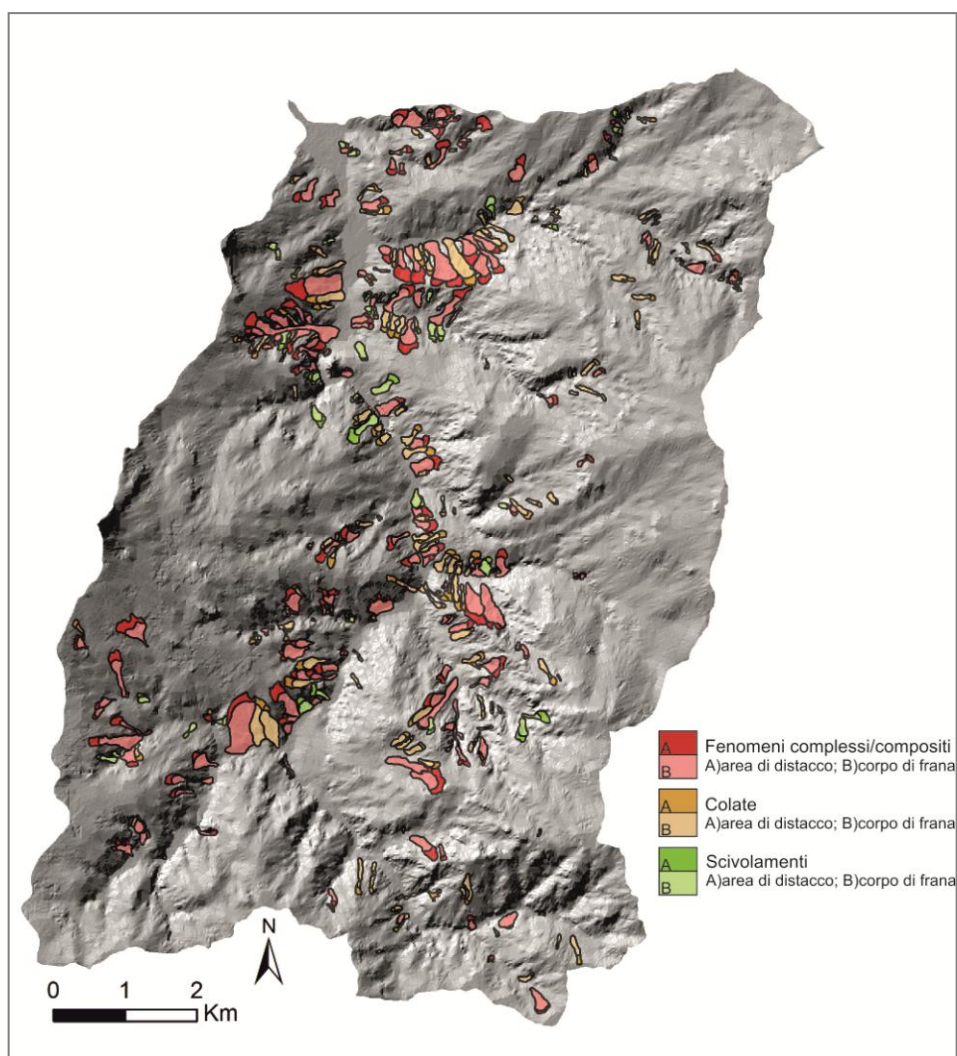


Figura 4.2-8 Mappa inventario delle frane per l'anno 2007.

Per quanto riguarda la FR si notano valori più alti per le coperture del suolo di tipo pascoli e cespuglieti, oltre alle ovvie zone denudate, mentre nelle litologie la frequenza maggiore è registrata nei più antichi depositi di frana (A1) e nelle Argille Varicolori (AV) (Tabella 4.2-12). Per la pendenza l'intervallo a maggiore frequenza è quello che va da 13° a 25,4° e per l'*internal relief* quello tra 33,9-56,5 (m/ha) (Tabella 4.2-12).

Tabella 4.2-12 Valori di Frequency Ratio ottenuti per i principali parametri geo-ambientali per l'anno 2007.

Fattore predisponente	Classe	Numero di pixel nella classe (ATc)	Numero di pixel in frana nella classe (AFc)	Frequency Ratio (AFc/AFt)/(ATc/ATs)
Distanza dalle strade (m)	50	718724	9480	0,51
	100	566244	16635	1,14
	150	440449	15474	1,37
	>=150	1605152	43976	1,07
Copertura del suolo	Zone urbane	32847	1	0,00
	Coltivo	1846071	41107	0,87
	Aree boscate	1094768	10235	0,36
	Pascoli	154083	15538	3,93

	Cespuglieti	153965	12562	3,18
	Zone Umide	7530	0	0,00
	Zone denudate	41304	6122	5,77
Litologia	A1	138188	6436	1,81
	AV	1937498	67927	1,37
	B	32067	0	0,00
	FTU	329881	2598	0,31
	MRD	137873	801	0,23
	SBO	216574	2734	0,49
	STG	64617	95	0,06
	TFL	473871	4810	0,40
Pendenza (°)	0-6,3	601148	4517	0,29
	6,3-12,7	1555123	27356	0,69
	13-19,0	840342	38699	1,79
	19,0-25,4	243357	11911	1,91
	25,4-31,7	64722	2435	1,46
	31,7-38,1	15709	435	1,08
	38,1-44,4	6580	176	1,04
	44,4-50,8	2452	27	0,43
	50,8-57,1	1061	9	0,33
	57,1-63,4	75	0	0,00
Esposizione	flat	146910	3533	0,94
	Northeast	375376	9722	1,01
	East	356260	11666	1,28
	Southeast	267196	10094	1,47
	South	308562	9878	1,25
	Southwest	415218	8895	0,83
	West	565827	10303	0,71
	Northwest	488926	10927	0,87
	North	406294	10547	1,01
Internal relief (m/ha)	0-11,3	288229	519	0,07
	11,3-22,6	1451807	18695	0,50
	22,6-33,9	1147208	42675	1,45
	33,9-45,2	342778	19104	2,17
	45,2-56,5	83691	4051	1,88
	56,5-67,8	11533	511	1,73
	67,8-79,13	3244	10	0,12
	79,13-90,4	1466	0	0,00
	90,4-101,7	445	0	0,00
	101,7-113,04	168	0	0,00
Altitudine (m)	241-314	105823	1838	0,68
	314-387	187897	11235	2,33
	387-460	265464	21488	3,15
	460-533	325765	12249	1,46
	533-606	467317	13527	1,13
	606-679	612072	11432	0,73
	679-752	699002	10495	0,58
	752-825	411390	2991	0,28
	825-899	205795	267	0,05
	899-972	50044	43	0,03
ATs		3330569		
Aft		85565		

In conclusione, le mappe inventario dei fenomeni franosi prodotte per le tre annate analizzate forniscono informazioni interessanti riguardo ai cambiamenti di franosità in un periodo di circa 50 anni. Dalle analisi delle frequenze si evince che i processi franosi si

distribuiscono nelle varie annate in maniera simile rispetto ai fattori predisponenti. Difatti per la copertura del suolo le frequenze maggiori si hanno sempre nelle classi di tipo pascolo, cespuglieto e zone denudate, e la loro transizione ad aree boscate determina una diminuzione nella frequenza delle frane (Figura 4.2-9). Le litologie più influenti sono quelle caratterizzate dalle Argille Varicolori (AV) e dai depositi antichi di frana, definiti stabilizzati dal foglio CARG (A1), il che suggerisce come i fenomeni franosi più superficiali si innescino all'interno di depositi di frana antichi. Per quel che riguarda i fattori morfologici, la pendenza mostra valori maggiori per le aree a media-alta pendenza, sempre superiori ai 10°. Infine, le aree comprese tra i 300 e i 600 m di quota s.l.m. sembrano essere quelle più predisposte all'instabilità.

I dati fin qui ottenuti in termini di inventario ed i valori di FR verranno utilizzati nell'ambito della produzione di mappe di suscettibilità passate e di scenari futuri, di seguito presentati al fine di capire come i cambiamenti di suscettibilità possano essere connessi con i cambiamenti di copertura del suolo.

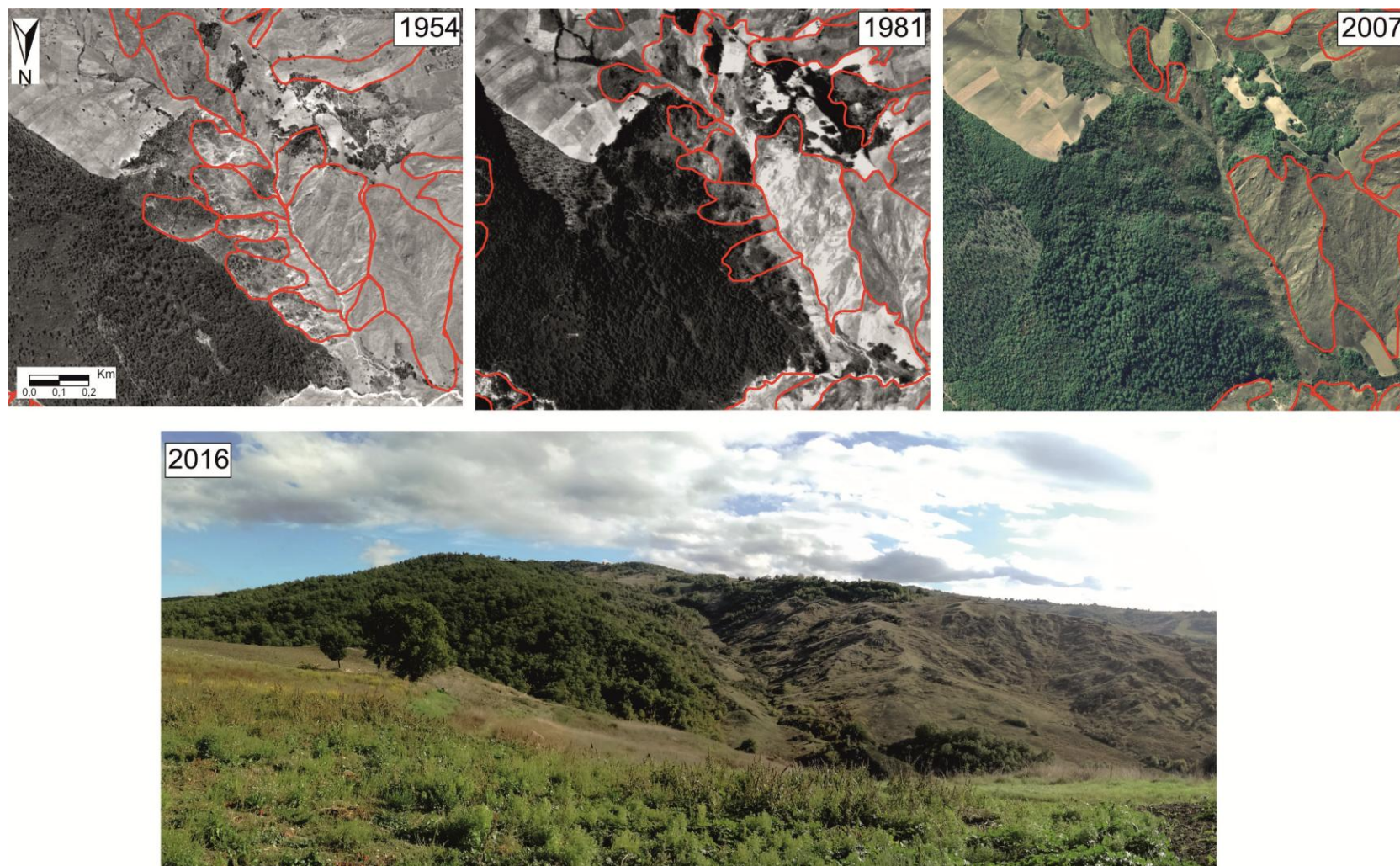


Figura 4.2-9 Particolare di un'area posta nel settore centrale del bacino del Rivo dove è evidente l'evoluzione della franosità (frane mappate in rosso) in relazione con il cambiamento della copertura del suolo nelle varie annate. Si noti come l'aumento dell'area boscata (area a sinistra nelle foto) porta progressivamente alla stabilizzazione dei fenomeni franosi. In basso è riportata una foto della panoramica attuale dell'area.

4.2.4 Analisi multi-temporale della suscettibilità da frana in relazione al cambiamento di copertura del suolo

Seguendo il metodo proposto nel paragrafo 3.2.5, e a partire dalla redazione delle carte inventario delle frane per ciascuna annata considerata, sono state ottenute tre diverse mappe di suscettibilità (Figura 4.2-10).

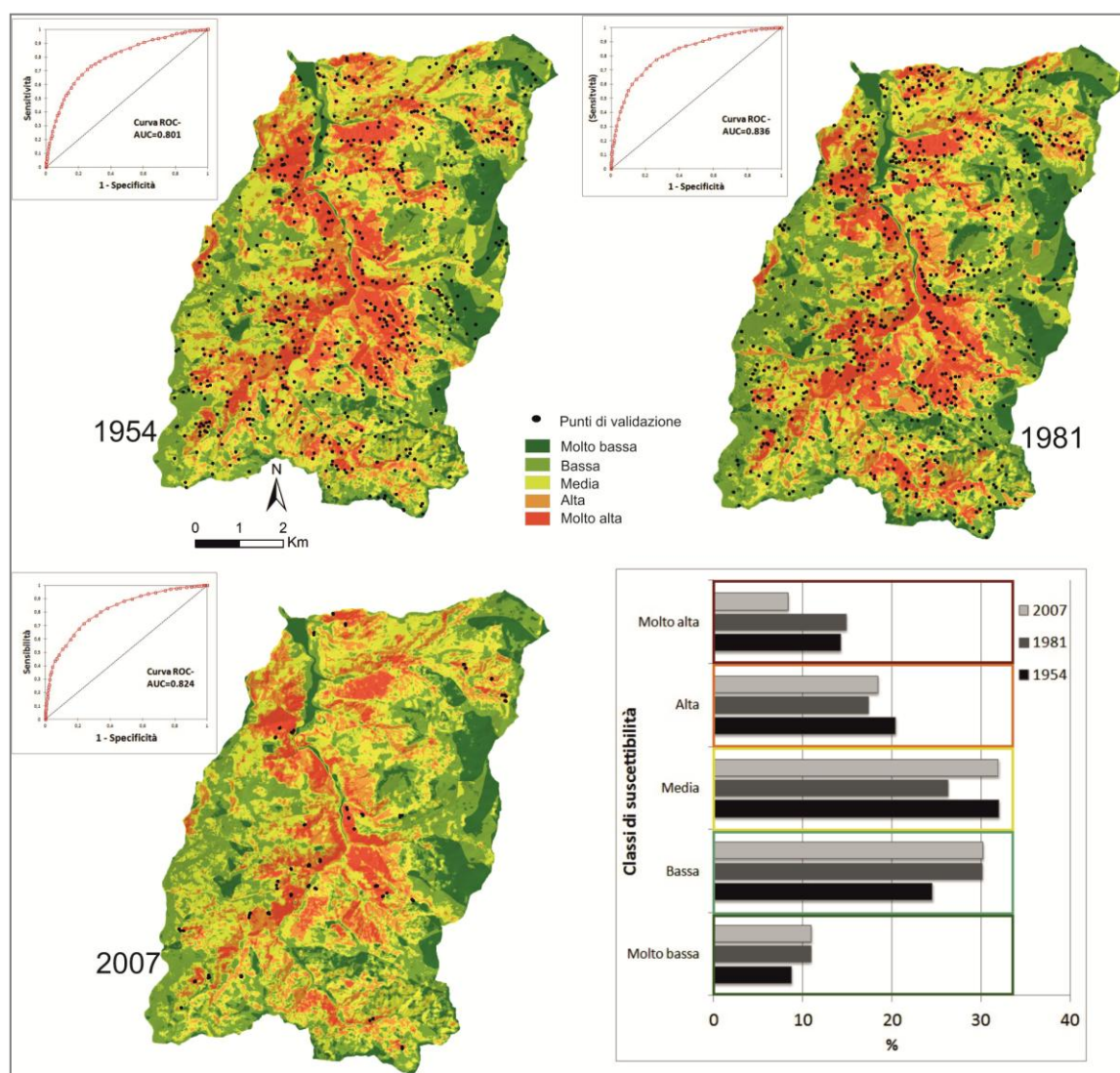


Figura 4.2-10 Mappe multi-temporali di suscettibilità con relativa curva ROC ed istogramma di distribuzione delle classi.

Le mappe di suscettibilità sono state riclassificate nelle seguenti cinque classi: molto bassa, bassa, media, alta e molto alta (limiti di classe: 0,35; 0,45; 0,55; 0,65). La bontà del risultato viene valutata mediante il calcolo dell'area sottesa dalla curva ROC, che ha dato valori di 0,829 per il 1954, 0,827 per il 1981, e 0,814 per il 2007 (Figura 4.2-10). In Tabella 4.2-13, sono riportate le principali statistiche relative alla distribuzione dei punti di validazione rispetto alle classi di suscettibilità. In ciascuna classe vengono riportati il numero dei punti di frana e

corrispondenti valori percentuali. I numeri riportati suggeriscono una buona capacità predittiva del metodo di analisi, difatti nelle classi più alte di suscettibilità ricade la maggior parte dei punti di frana con una punta dell'80,3% per il 1954. Al contrario un valore sempre inferiore all'8% dei punti per tutti gli anni, si ritrova nelle due classi più basse. I valori ottenuti possono considerarsi soddisfacenti sulla base del modello e dei dati utilizzati.

Tabella 4.2-13 Distribuzione dei punti di validazione nelle diverse classi di suscettibilità per le tre mappe multi-temporali realizzate.

Classi di suscettibilità	Suscettibilità 1954		Suscettibilità 1981		Suscettibilità 2007	
	Punti di frana (set di validazione 1981)	Punti frana (%) (set di validazione 1981)	Punti di frana (set di validazione 2007)	Punti frana (%) (set di validazione 2007)	Punti di frana (set di validazione 10% - 2007)	Punti di frana (%) (set di validazione 10% - 2007)
molto bassa	1	0,3	2	0,5	1	0,9
bassa	11	3,5	20	5,5	7	6,5
media	49	15,8	52	14,2	18	16,7
alta	93	30,0	113	31,0	32	29,6
molto alta	156	50,3	178	48,8	50	46,3
Totale	310		365		108	

Dal confronto delle mappe (Figura 4.2-10 e Figura 4.2-11) e dall'analisi della Tabella 4.2-14, si evince un decremento nell'intero periodo delle classi più alte di suscettibilità (molto alta e alta), ed un corrispondente incremento delle più basse (bassa e molto bassa). Infatti sommando le due classi più alte per ogni annata considerata, è possibile notare un decremento della loro estensione rispetto all'area totale, in particolare con un passaggio da 34,66% nel 1954, al 32,40% nel 1981, a 26,81% nel 2007 (Figura 4.2-10 e Tabella 4.2-14).

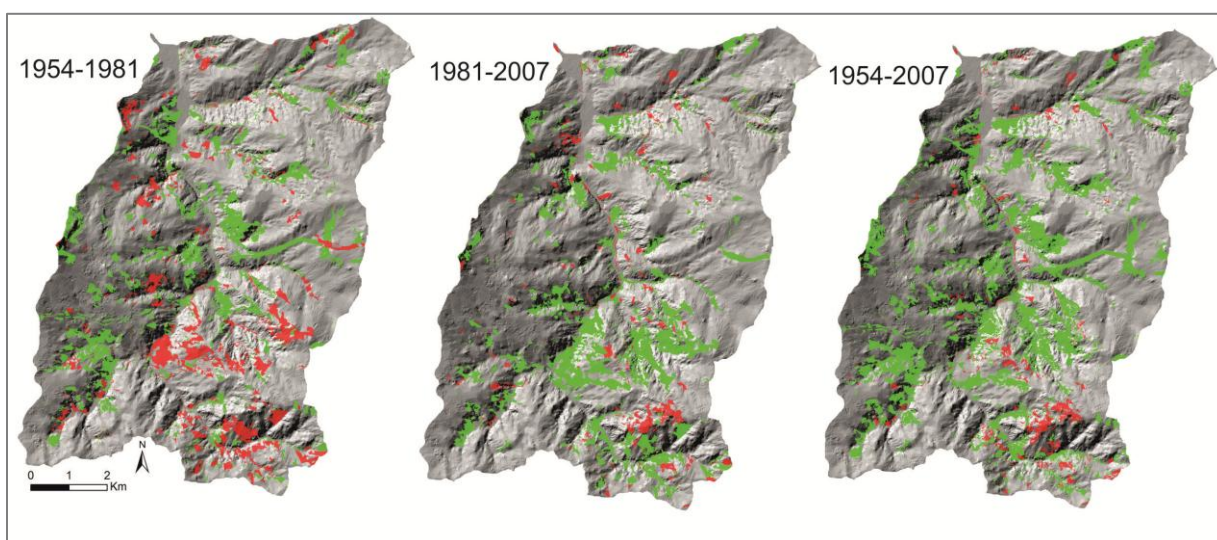


Figura 4.2-11 Variazioni spaziali della suscettibilità. In verde le aree in cui si attesta un decremento di classe ed in rosso quelle in cui viene registrato un aumento.

Tabella 4.2-14 Percentuale di area in ogni classe di suscettibilità riferita alle varie annate di studio.

Classi di suscettibilità	Area in percentuale per ogni annata		
	1954	1981	2007
Molto bassa	8,73	10,97	10,95
Bassa	24,59	30,25	30,24
Media	32,03	26,38	32,00
Alta	20,42	17,43	18,45
Molto alta	14,24	14,97	8,36

Combinando i cambiamenti osservati per la suscettibilità con i cambiamenti osservati per le transizioni di coperture del suolo analizzate, l'informazione ottenuta suggerisce che per il primo periodo di tempo analizzato (1954-1981) il più rilevante decremento di suscettibilità è occorso laddove la copertura del suolo cambia da pascolo ad aree a coltivo (~5% dell'intera area). Un altro importante decremento si osserva in corrispondenza delle transizioni tra cespuglieti e aree boscate (~2,5%). Cambiamenti inferiori all'1% sono registrati al passaggio tra denudati verso pascoli o cespuglieti. Al contrario, un aumento di suscettibilità è registrato principalmente alla transizione da aree a coltivo verso pascolo e da aree a coltivo verso cespuglieti, rispettivamente il 2,99% e l'1,3%. I risultati complessivi dei cambiamenti avvenuti tra il 1954 e il 1981 sono riportati in Tabella 4.2-15.

Tabella 4.2-15 Variazioni percentuali di suscettibilità sull'intera area. In rosso sono evidenziati gli incrementi ed in verde i decrementi per ciascuna classe.

Periodo di transizione 1954-->1981(valori percentuali sull'intera area)							
1954	1981						
	Urbano	Coltivo	Boschi	Pascolo	Cespuglieti	Zone Umide	Denudati
Urbano	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Coltivo	0,0	0,0	0,0	3,0	1,3	0,0	0,0
	0,2	34,8	1,3	0,3	0,2	0,1	0,0
	0,1	11,7	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Boschi	0,0	0,0	0,5	0,1	0,7	0,0	0,0
	0,0	0,4	19,0	0,0	0,1	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pascolo	0,0	0,0	0,0	1,9	0,2	0,0	0,0
	0,0	0,7	0,1	3,6	1,2	0,0	0,2
	0,0	5,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Cespuglieti	0,0	0,0	0,0	0,6	0,7	0,0	0,0
	0,0	0,2	1,0	0,3	1,5	0,0	0,0
	0,0	0,4	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Zone Umide	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denudati	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	1,4	0,5	0,0	0,6
	0,0	0,4	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0
Incremento totale (%)		9,34					
Decremento Totale (%)		21,54					

Per il secondo periodo analizzato (1981-2007), si osserva una diminuzione delle più alte suscettibilità di circa il 5,6% (Tabella 4.2-14). La maggior parte dei cambiamenti in termini di diminuzione occorre in corrispondenza della transizione da pascoli a coltivo (3,4%) e da cespuglieti e pascolo ad aree boscate (rispettivamente, 3,8% e 1,71%) (Tabella 4.2-16).

Tabella 4.2-16 Variazioni percentuali di suscettibilità sull'intera area. In rosso sono evidenziati gli incrementi ed in verde i decrementi di classe.

Periodo di transizione 1981-->2007 (valori percentuali sull'intera area)							
1981	2007						Zone
	Urbano	Coltivo	Boschi	Pascolo	Cespuglieti	Umide	
Urbano	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Coltivo	0,0	6,4	0,0	0,9	0,7	0,0	0,2
	0,5	42,1	1,7	0,1	0,2	0,0	0,1
	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Boschi	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
	0,0	0,8	21,0	0,0	0,1	0,0	0,0
	0,0	0,0	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Pascolo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,3	0,2	1,9	1,3	0,0	0,5
	0,0	3,4	1,7	1,0	1,0	0,0	0,0
Cespuglieti	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,1	0,3	0,2	0,7	0,0	0,0
	0,0	1,0	3,8	0,0	0,4	0,0	0,0
Zone Umide	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,3	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denudati	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1	0,0	0,3
	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
Incremento totale (%)		8,77					
Decremento Totale (%)		16,43					

I cambiamenti osservati e fin qui descritti suggeriscono in generale che il decremento della suscettibilità è attribuibile principalmente alla conversione di pascolo verso aree a coltivo e subordinatamente di aree denudate verso aree a pascolo e cespuglieti. Inoltre il decremento, sembra essere legato anche al cambio di cespuglieti verso aree a coltivo e aree boscate. Si può dunque desumere che le aree boscate hanno un effetto di stabilizzazione, insieme al coltivo. A riguardo, la prima ipotesi è molto ben documentata in letteratura (Schwarz et al., 2010; Caviezel et al., 2014), mentre per quanto riguarda l'azione del coltivo la deduzione non è così immediata. Difatti esistono numerosi studi precedenti che sostengono l'effetto negativo della coltivazione sulla stabilità del pendio (Begueria, 2006; Wasowski et al., 2014). Tuttavia nel caso studio qui analizzato la transizione da tipi di copertura del suolo che non prevedono alcuna azione antropica di manutenzione del suolo, o abbandono, quali aree denudate o pascoli verso aree a coltivo,

mostra un effetto positivo sulla distribuzione spaziale ed estensione della propensione al dissesto. Infatti nel bacino del Rivo è possibile affermare, a valle delle osservazioni fatte, che la presenza di aree a coltivo, che richiede una regimazione delle acque, risulta in una migliore azione di manutenzione del territorio che determinerebbe una migliore stabilità del pendio. Si osservano altresì in pochi casi, dei cambiamenti nelle classi di suscettibilità anche in corrispondenza di copertura del suolo persistenti. Le maggiori evidenze si hanno in corrispondenza del coltivo al passaggio tra il 1954 e il 1981 con un miglioramento del grado di suscettibilità dell'11% che al contrario invece sembra peggiorare tra il 1981 e il 2007 (6.4%). Questo potrebbe essere spiegato dalle differenti tecniche di agricoltura utilizzate nei vari intervalli di tempo. Tuttavia questo è un aspetto che andrebbe indagato dettagliando le tecniche di coltivo utilizzate nel tempo e che al momento non sono tenute in considerazione in questo lavoro. Andrebbero inoltre indagate con maggiore dettaglio le variazioni all'interno delle altre classi che risultano essere stabili nel tempo, magari andando ad individuare delle sottocategorie all'interno delle stesse, la cui variazione può portare a cambiamenti di franosità.

Lo stesso metodo di riclassificazione utilizzato per le mappe di suscettibilità del passato è stato applicato anche per le mappe di suscettibilità ottenute per scenari futuri di copertura del suolo. Naturalmente per questi non è stato possibile verificare la bontà del modello in termini di AUC-ROC *Curve*, non avendo ovviamente a disposizione un database di frane future. Il modello si può considerare comunque attendibile visti i risultati di validazione ottenuti per le annate passate, ed avendo tenuto costanti le variabili e i loro pesi utilizzati anche per gli scenari futuri ad eccezione della copertura del suolo (vedi par. 3.2.5).

In Figura 4.2-12 si riportano dunque le mappe di suscettibilità ottenute per i vari scenari futuri di copertura del suolo, in riferimento all'anno 2030 e ai due modelli creati per l'annata 2050 (a,b). Dall'analisi dell'istogramma in Figura 4.2-12 e dai valori mostrati in Tabella 4.2-17, si evince come per gli scenari 2030 e 2050a vi sia una continuità temporale con le variazioni passate. Si evince, difatti, un aumento della percentuale di aree ricadenti nelle classi “molto bassa” e “bassa”, a discapito principalmente della classe “media” e, subordinatamente, delle classi “alta” e “molto alta”.

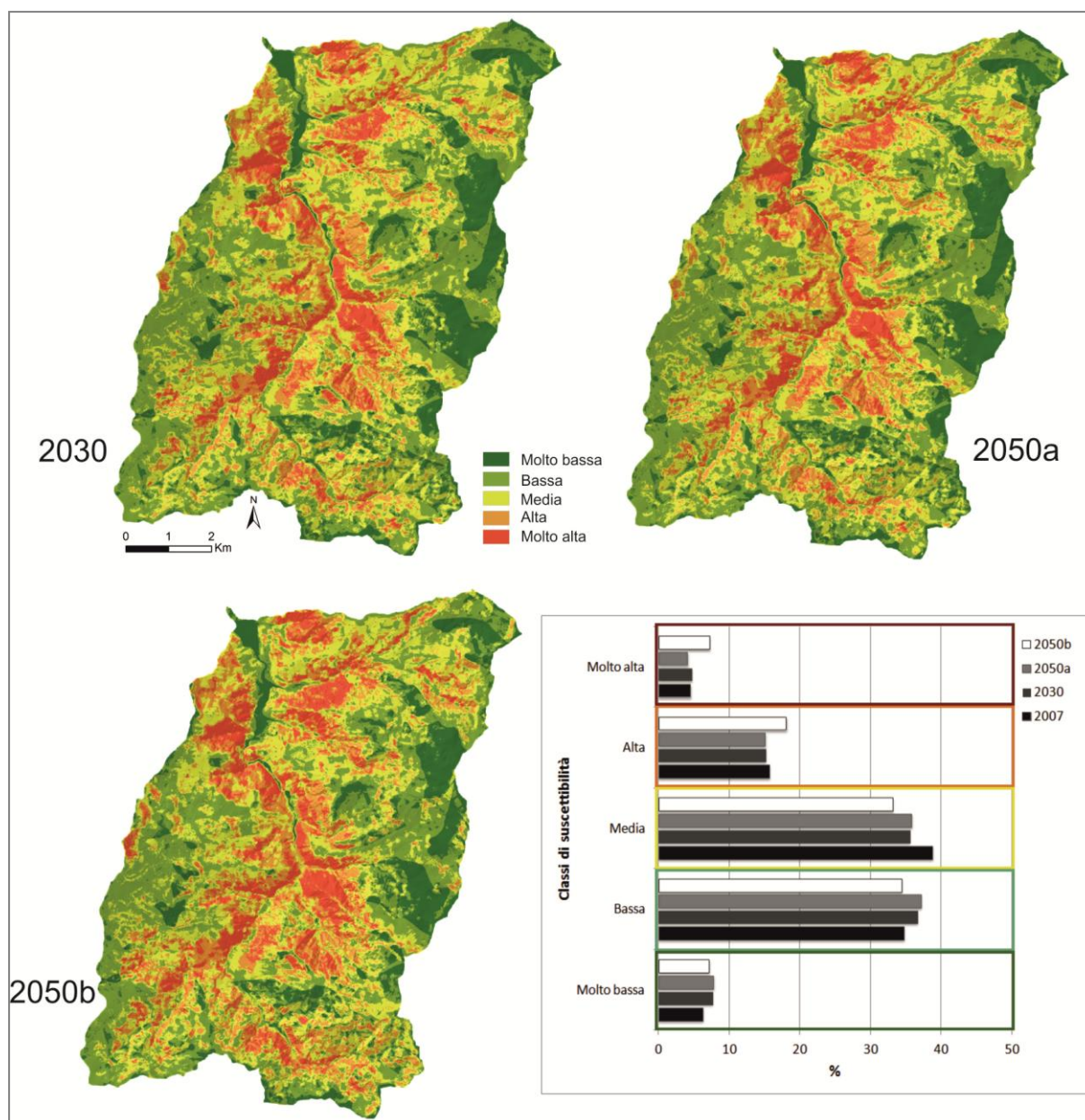


Figura 4.2-12 Mappe multi-temporali di suscettibilità ed istogramma di distribuzione delle classi.

Tabella 4.2-17 Percentuale di area in ogni classe di suscettibilità riferita ai vari scenari futuri.

Classi di suscettibilità	Area in percentuale per ogni annata			
	2007	2030	2050a	2050b
Molto bassa	6,26	7,70	7,77	7,14
Bassa	34,76	36,71	37,15	34,41
Media	38,79	35,60	35,84	33,17
Alta	15,68	15,22	15,11	18,08
Molto alta	4,52	4,76	4,12	7,20

Sommando le due classi più basse (molto bassa e bassa) per ogni annata considerata, è possibile notare un aumento della loro estensione rispetto all'area totale: in particolare, si osserva un passaggio da 41,2% nel 2007, al 44,3% nel 2030, a 44,9% nel 2050a (Figura 4.2-13 e Tabella 4.2-15). Per le classi più alte si osserva invece un leggero decremento, passando da 20,2% per

l'anno 2007, a 19,96% per l'anno 2030, e a 19,23% per il 2050a. Situazione opposta si evince per lo scenario 2050b, con un sensibile aumento delle aree a più alta suscettibilità rispetto all'annata 2007, passando da 26,8% a 30,0% per il 2050b, a discapito quasi esclusivamente della classe di suscettibilità media.

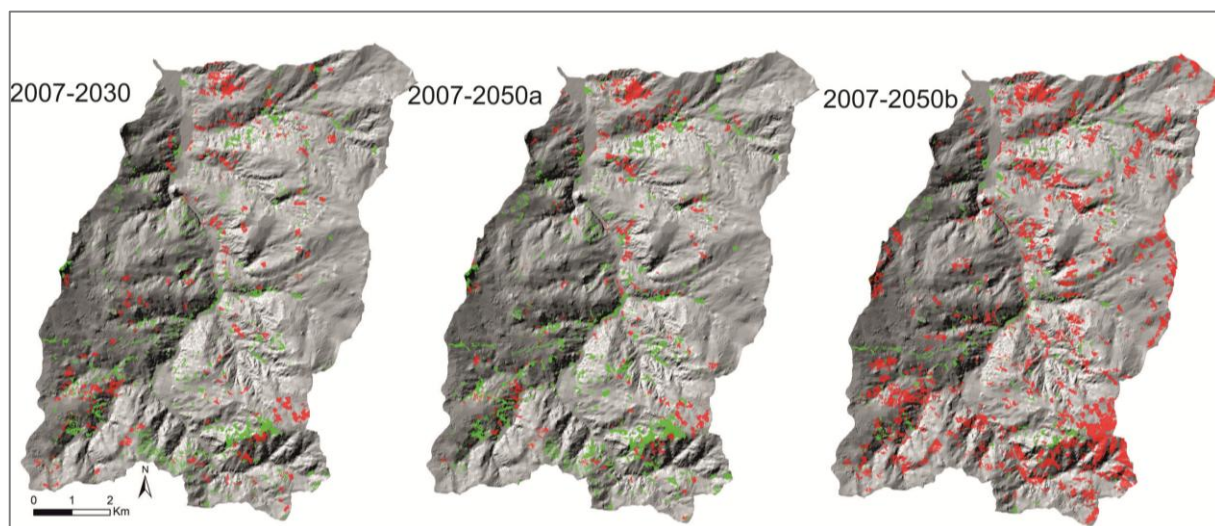


Figura 4.2-13 Variazioni spaziali della suscettibilità. In verde le aree in cui si attesta un decremento di classe ed in rosso quelle in cui viene registrato un aumento.

In particolare, per lo scenario relativo all'anno 2030 i principali cambiamenti avvenuti dal 2007 sono riferiti ad un incremento di suscettibilità in corrispondenza del passaggio da aree a coltivo verso cespuglieti e pascolo (2,1% e 1%, rispettivamente). Si osserva inoltre un decremento di suscettibilità nelle zone a coltivo rimaste stabili nello scenario, il che è spiegabile ipotizzando un miglioramento della manutenzione delle aree a coltivo che, mediante la regimazione delle acque, determina una maggiore stabilità dei pendii. Una diminuzione della suscettibilità si ha anche al passaggio da cespuglieti e coltivo verso aree boscate (1,5% e 1,0%).

Tabella 4.2-18 Variazioni percentuali di suscettibilità sull'intera area. In rosso sono evidenziati gli incrementi ed in verde i decrementi di classe.

Periodo di transizione 2007-->2030 (valori percentuali sull'intera area)							
2007	2030						
	Urbano	Coltivo	Boschi	Pascolo	Cespuglieti	Zone Umide	Denudati
Urbano	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Coltivo	0,0	0,0	0,0	1,0	2,1	0,0	0,0
	0,2	43,0	3,4	0,2	0,4	0,0	0,0
	0,1	4,1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Boschi	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,2	31,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Pascolo	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0

	0,0	0,1	0,0	3,2	0,1	0,0	0,0
	0,0	0,5	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Cespuglieti	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,3	0,0	2,5	0,0	0,0
	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Zone Umide	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denudati	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	1,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Incremento totale (%)		3,66					
Decremento Totale (%)		8,81					

Lo stesso trend si osserva per lo scenario 2050a, che mostra un incremento della suscettibilità al passaggio da coltivo a pascolo o cespuglieto ed una diminuzione nel passaggio da coltivo a aree boscate, e da pascoli a coltivo, ma anche nelle zone in cui persiste il coltivo (Tabella 4.2-19).

Tabella 4.2-19 Variazioni percentuali di suscettibilità sull'intera area. In rosso sono evidenziati gli incrementi ed in verde i decrementi di classe.

Periodo di transizione 2007-->2050a (valori percentuali sull'intera area)							
2007	2050a						
	Urbano	Coltivo	Boschi	Pascolo	Cespuglieti	Zone Umide	Denudati
Urbano	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Coltivo	0,0	0,0	0,0	1,6	1,1	0,0	0,0
	0,4	43,1	3,5	0,2	0,2	0,0	0,0
	0,2	4,1	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
Boschi	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,4	31,3	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Pascolo	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,1	0,0	2,7	0,2	0,0	0,0
	0,0	0,7	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Cespuglieti	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,5	0,0	1,6	0,0	0,0
	0,0	0,1	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Zone Umide	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denudati	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,8
	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Incremento totale (%)		3,20					
Decremento Totale (%)		10,17					

Una situazione diversa si osserva invece per lo scenario 2050b, dove si è ipotizzata una importante diminuzione delle aree boscate, e subordinatamente delle aree a coltivo (vedi par. 3.2.4). Dall'analisi delle cifre riportate nella Tabella 4.2-20 le classi maggiormente coinvolte nell'incremento della suscettibilità da frana sono derivate dalla perdita di coltivo a favore di pascoli e di cespuglieti (2,8% e 4,3%) e al passaggio da boschi a pascolo (4%).

Tabella 4.2-20 Variazioni percentuali di suscettibilità sull'intera area. In rosso sono evidenziati gli incrementi ed in verde i decrementi di classe.

Periodo di transizione 2007-->2050b (valori percentuali sull'intera area)							
2007	2050b					Zone	
	Urbano	Coltivo	Boschi	Pascolo	Cespuglieti	Umide	Denudati
Urbano	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Coltivo	0,0	0,0	0,0	2,8	4,3	0,0	0,0
	0,4	41,8	0,4	0,4	0,9	0,0	0,0
	0,2	4,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Boschi	0,0	0,0	0,0	4,0	0,3	0,0	0,0
	0,6	26,8	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
Pascolo	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,1	0,0	3,1	0,3	0,0	0,0
	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cespuglieti	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,1	0,1	3,4	0,0	0,0
	0,0	0,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Zone Umide	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Denudati	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,8
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Incremento totale (%)		12,11					
Decremento Totale (%)		6,88					

Sulla base dei cambiamenti futuri di copertura del suolo, si può dunque concludere che in un regime di continuità temporale di cambiamento, in cui i cambiamenti passati guidano quelli futuri, vi è una diminuzione della propensione all'instabilità da frana, con un parziale decremento delle più alte classi di suscettibilità a favore delle più basse. Questo si può attribuire soprattutto all'aumento delle aree boscate che fungono da fattore stabilizzante in riferimento alla propensione al dissesto, come già descritto in precedenza. Simulando invece una perdita della stessa classe (vedi modello 2050b), si evince una variazione negativa nei confronti della stabilità.

Le analisi condotte evidenziano come cambiamenti di copertura del suolo nell'area di studio influenzano l'instabilità di pendio e la severità delle classi di suscettibilità in termini di

estensione e distribuzione. L'effetto dei cambiamenti di copertura del suolo sulla franosità, soprattutto superficiale, è stata già documentata in letteratura (Glade, 2003; Begueria, 2006), anche per aree simili a quella qui analizzata (Persichillo et al., 2017). In questo studio inoltre si è dimostrato come la copertura del suolo, essendo uno dei fattori principali negli studi di suscettibilità da frana, non possa essere ritenuto costante nel tempo. Difatti la sua variazione porta ad avere una spazializzazione differente delle varie classi di suscettibilità da frana, così come dimostrato in Reichenbach et al. (2014).

Un aumento di vegetazione boschiva può determinare una maggiore stabilità del pendio andando a modificare il regime di umidità del suolo attraverso processi di evapotraspirazione, fornendo con le radici una maggiore coesione al manto pedologico (Begueria et al., 2006; Sidle e Ochiai, 2006; Ghesten et al., 2011; Reichenbach et al., 2014). Lo studio dimostra inoltre che l'abbandono delle aree a coltivo che si trasformano in aree incolte (a pascolo e cespuglieti) porta a individuare zone con il più alto grado di instabilità. Ciò può essere dovuto dunque alla negativa qualità delle pratiche di mantenimento in seguito all'abbandono di aree coltivate che porta all'intensificarsi di processi di erosione, con conseguenti fenomeni di instabilità così come verificato anche da Persichillo et al. (2017), per un'area nord-appeninica dell'Oltrepò Pavese. Sebbene i cambiamenti di copertura del suolo del passato ed i loro effetti sulla franosità siano stati esaminati in letteratura, lo studio di possibili scenari di cambiamento futuri, e la conseguente simulazione degli effetti sul pendio, sono tuttora poco esplorati, ad eccezione di pochi esempi come Promper et al. (2014) e Reichenbach et al. (2014). In questo studio sono stati presentati tre diversi possibili scenari (2030, 2050a, e 2050b) che dimostrano come per il futuro corrette pratiche di gestione del territorio, quali buone pratiche agricole ed aumento delle aree boscate soprattutto in aree degradate, possano determinare una diminuzione della suscettibilità da frana (scenario 2030 e 2050a). Al contrario, in uno scenario caratterizzato da condizioni climatiche peggiorative (2050b) (vedi par. 3.2.3) la diminuzione di aree boscate e l'abbandono delle aree a coltivo potrebbe portare ad un aumento considerevole della suscettibilità da frana.

E' evidente come i dati fin qui presentati, le indagini effettuate e le modellizzazioni eseguite possono essere una linea guida per una gestione territoriale responsabile, sia per l'area del bacino del Rivo che per aree rurali limitrofe o simili presenti nell'Appennino meridionale.

4.2.5 Stima del danno agricolo indotto da frana

Per una stima del possibile danno prodotto dalle frane, sono state applicate due diverse valutazioni (vedi par. 3.2.6). La prima è basata essenzialmente sul danno attuale, inteso come la perdita di valore fondiario dovuto alle frane mappate nell'inventario fenomeni franosi IFFI. Una seconda valutazione è stata realizzata attraverso la realizzazione di una carta di propensione al dissesto (susceptibilità), con lo scopo di ottenere una possibile perdita di Valore Agricolo Medio (VAM) in termini di esposizione futura.

In un primo momento sono stati moltiplicati i VAM corrispondenti ad ogni classe di uso del suolo (vedi Tabella 3.2-2) per il *layer* delle frane a cui ad ogni stato di attività è stato associato un Indice di Danno (DI) con i valori espressi nella Tabella 3.2-3.

I risultati ottenuti sono stati sintetizzati nella Tabella 4.2-21, dalla cui analisi si evince che le perdite più alte in termini assoluti di valore monetario sono collegate alle aree descritte come seminativi in aree non irrigue, seguite dalle aree occupate da colture agraria con presenza di spazi naturali.

In termini percentuali, le aree che hanno una maggiore sofferenza sono quelle occupate da uliveti, caratterizzate da una perdita del proprio valore di circa il 43,40% che però nel complesso occupano solo una piccola porzione del territorio, pari a circa lo 0,38%. Secondariamente la classe che sembra soffrire di una discreta perdita in termini percentuali è quella delle aree a pascolo naturale. Nel complesso è stato stimato sulla base del modello da noi proposto che per la valutazione di un danno attuale, basato sulla mappatura ufficiale dei fenomeni franosi estratta dal database IFFI, il computo totale del deprezzamento (DV) è di 10.129.656 euro, con una percentuale di perdita totale pari al 16,60%. Questo fa sì che il valore Agricolo Reale (VAR) si ponga a 50.877.305 euro, da un iniziale valore totale (VAT) pari a 61.006.962 (vedi Tabella 4.2-21).

Il risultato ottenuto con la distribuzione di perdita al m^2 è stato sintetizzato inoltre nella Figura 4.2-14 con valori di perdita compresi tra 0 a 1.72 euro al m^2 . Difatti per aree non soggette ad alcun fenomeno franoso non è stata riconosciuta nessuna perdita in termini di VAM; le maggiori perdite invece sono collegate a poche aree ricadenti nella classe degli uliveti caratterizzate da frane attive e dunque associate a perdite con un coefficiente di *Damage Index* pari a 1, e quindi pari al 100% della perdita (Tabella 3.2-3).

Tabella 4.2-21 Distribuzione delle classi di copertura del suolo, valori di VAM, VAT e DV e perdita in percentuale.

Classi di copertura del suolo (Corine land cover 2006)	Area in m ²	% occupate dalle varie classi sul totale dell'area	Vam 2012	Valore Agricolo Totale (VAT) per ogni classe di uso del suolo (€)	Danno economico (DV) distribuito in ogni classe (€)	% di perdita in ogni classe
Aree a pascolo naturale	5111880	6,16	0,37	1.891.400	731.842,59	38,69
Brughiere e cespuglieti	2682710	3,23	0,36	965.776	255.442,18	26,45
Aree occupate da colture agraria con presenza di spazi naturali	16786400	20,22	0,95	15.947.100	3.453.782,63	21,66
Boschi	20496400	24,68	0,49	10.043.200	1.269.020,64	12,64
Seminativi in aree non irrigue	37642700	45,33	0,84	31.619.900	4.185.370,52	13,24
Uliveti	313713	0,38	1,72	539.586	234.198,07	43,40
Valore agricolo Totale (VAT)				61.006.962		
Danno economico Agricolo (DV)					10.129.656	16,60
Valore agricolo Reale (VAR)=VAT-DV					50.877.305	

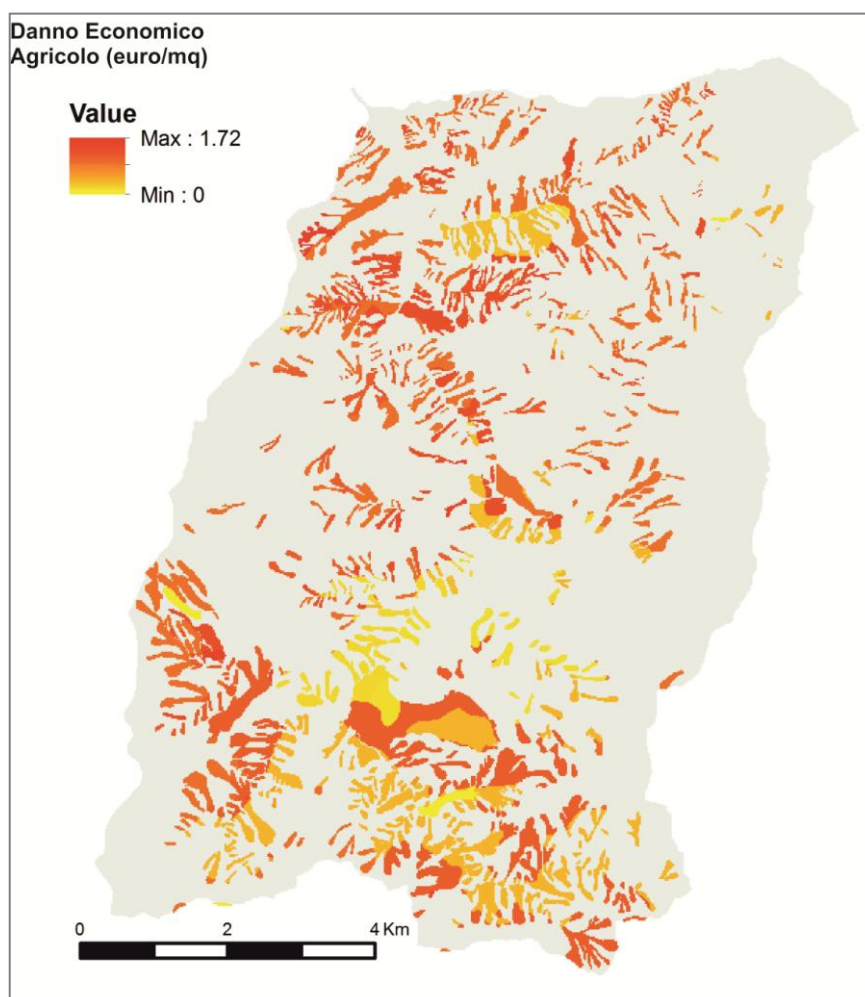


Figura 4.2-14 Mappa del danno economico agricolo (DV) espresso in euro/mq.

La seconda parte del lavoro è consistita nel realizzare il calcolo della possibile perdita di Valore Agricolo Atteso (VAA) in termini di esposizione futura, in funzione delle classi di suscettibilità riconosciute nell'area, seguendo la matrice proposta in Tabella 3.2-4.

La mappa di suscettibilità calcolata attraverso il modello *Weight of Evidence* (WOFI), riportata in Figura 4.2-15, è stata interpolata in un primo momento con le sole frane esistenti (vedi Figura 3.2-11) al fine di riconoscere il valore di perdita dovuto a frane caratterizzate da uno specifico stato di attività. Successivamente, per aree non caratterizzate dalla presenza di frane si è tenuto conto solo della classe di suscettibilità in cui i vari terreni ricadono.

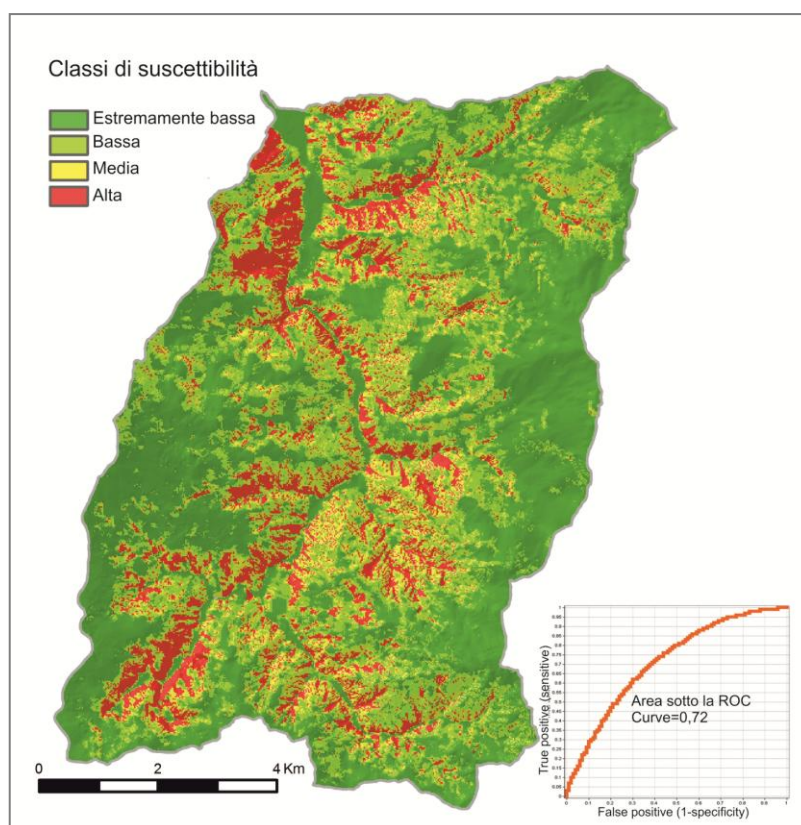


Figura 4.2-15 Mappa di suscettibilità realizzata con il metodo della *Weight of Evidence* (WOFI), diviso in quattro distinte classi di suscettibilità.

Nella Tabella 4.2-22 e nella Figura 4.2-16, sono riportati i valori delle perdite di valore di danno agricolo atteso (DEA) tendendo in considerazione anche la propensione al dissesto ottenuta mediante il modello di suscettibilità descritto. Dall'analisi dei dati si evince come le maggiori perdite in termini percentuali siano riferite alle aree a pascolo naturale e secondariamente alla classe degli uliveti. In termini assoluti le classi di copertura del suolo caratterizzate dai valori più alti di perdita sono invece le aree definite come seminativi in aree non irrigue e le aree occupate da coltura agraria con presenza di spazi naturali. In totale il danno

atteso in termini di propensione al dissesto è quantificato in 13.827.658 euro, che consiste in percentuale ad un valore pari al 22,66% dell'intera area.

Tabella 4.2-22 Distribuzione delle classi di copertura del suolo, valori di DEA, di VAA e perdita in percentuale attesa sulla base della suscettibilità da frana.

Classi di copertura del suolo (Corine land cover 2006)	Valore Agricolo Totale (VAT) per ogni classe di uso del suolo (€)	Danno economico Atteso (DEA) distribuito in ogni classe (€)	% di perdita
Aree a pascolo naturale	1.891.400	819.802	43,34
Brughiere e cespuglieti	965.776	308.750	31,97
Aree occupate da colture agraria con presenza di spazi naturali	15.947.100	3.992.204	25,03
Boschi	10.043.200	1.975.661	19,67
Seminativi in aree non irrigue	31.619.900	6.539.702	20,68
Uliveti	539.586	191.539	35,50
Valore agricolo Totale (VAT)	61.006.962		
Danno economico Atteso (DEA)		13.827.658	22,66
Valore agricolo Atteso (VAA)=VAT-DEA		47.179.304	

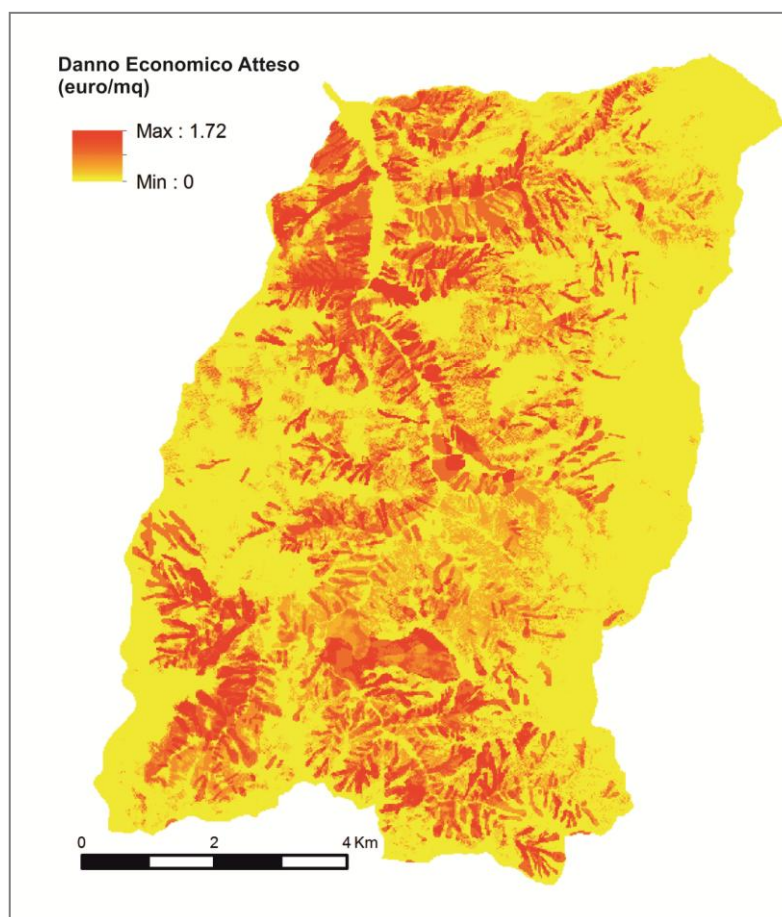


Figura 4.2-16 Mappa del danno agricolo atteso (DEA) espresso in euro/mq.

Dalle analisi e dal confronto numerico delle Tabella 4.2-21 e Tabella 4.2-22, si evince come considerando l'analisi di suscettibilità e i vari indici esperti utilizzati, il valore agricolo totale atteso (VAA) abbia una percentuale di perdita maggiore del 6% rispetto al valore del danno

agricolo reale (VAR), che tiene invece in considerazione i soli fenomeni franosi mappati dall'inventario IFFI. Le differenze maggiori si possono riscontrare nella classe definita come aree seminate non irrigue, in cui vi è una perdita economica reale (DI) pari 4.185.371 euro, che passa a 6.539.702 euro se si tiene in considerazione il danno atteso derivato dal considerare anche la propensione futura del terreno alla franosità. Subordinatamente, l'altra classe caratterizzata dalle variazioni maggiori tra il danno calcolato con le due differenti metodologie è quella descritta come area occupata da coltura agraria con presenza di spazi naturali, le cui perdite passano da 3.453.783 a 3.992.204 euro.

Le analisi svolte mirano a dare una prima parziale applicazione di una metodologia valutativa di tipo *expert based*, attraverso l'integrazione di tecnologie GIS e procedure estimative in grado di consentire un'analisi spaziale relativa alla quantificazione del danno economico causato dalle frane, sia per quelle già occorse che in termini di propensione al dissesto futuro, in un contesto di bacino rurale la cui economia è improntata principalmente sull'agricoltura.

Inoltre l'integrazione di una metodologia, in grado di valutare anche la propensione al dissesto come termine di possibile svalutazione, può rappresentare un efficace aiuto in termini di gestione del territorio. Difatti l'ammontare del danno e la caratterizzazione del danno atteso in termini di propensione al dissesto può rendere possibile una migliore pianificazione degli interventi pubblici, basata su una scala di priorità, utile anche a pianificare le politiche di prevenzione sulla base del rischio e della magnitudine del danno.

5 Le soglie pluviometriche

Come descritto nei capitoli precedenti, nel corso del II anno di dottorato, l'attività di ricerca si è arricchita di una collaborazione con il CNR-IRPI della sede di Bari. Obiettivo di questa collaborazione è stata la identificazione di soglie pluviometriche per valutare il ruolo delle precipitazioni come fattore d'innescio di fenomeni franosi (Guzzetti et al., 2007, 2008), attraverso la raccolta e l'elaborazione delle segnalazioni di eventi di frane avvenute in concomitanza di eventi pluviometrici nel territorio Pugliese, e più specificatamente nella provincia di Foggia, il settore regionale a maggiore suscettibilità da frana.

Vista la vicinanza geografica e le simili caratteristiche morfologiche, geografiche e climatiche dei settori collinari e montani appartenenti alla provincia foggiana, con i confinanti settori molisani (vedi par. 2.2), si è cercato dunque di creare una soglia pluviometrica comune per tutto il territorio (Puglia-Molise), applicabile dunque anche nell'area oggetto di studio del presente progetto di ricerca di dottorato.

Più specificatamente, per la regione Molise sono stati presi in considerazioni solo gli eventi localizzati nella provincia di Campobasso, essendo le caratteristiche geologiche, geomorfologiche e ambientali di tale zona molto simili a quelle del Sub-Appennino Dauno.

Per la Puglia, alcuni dati sono stati recuperati anche dall'area Garganica, che seppur non presentando caratteri geologici e geomorfologici simili al Sub-Appennino Dauno e al territorio della provincia di Campobasso, essendo occupato quasi interamente da complessi litologici carbonatici (sedimenti di piattaforma che variano da calcari tipo scaglia a calcari oolitici), risulta essere in continuità geografica con il territorio molisano. L'unione delle diverse aree ha consentito di raccogliere, un numero maggiore di dati utili al calcolo delle suddette soglie pluviometriche, con un miglioramento dell'attendibilità statistica dell'analisi (vedi paragrafi successivi).

La costruzione di soglie pluviometriche può rappresentare un importante supporto per le autorità coinvolte nella gestione del rischio da frana in Molise (quali ad esempio Protezione Civile ed Autorità di Bacino), contribuendo ad integrare la conoscenza del territorio con informazioni al momento non disponibili in regione. Tali dati potrebbero a loro volta aiutare a sviluppare un sistema di allerta per frane indotte da eventi pluviometrici.

Le soglie pluviometriche possono infatti essere usate all'interno di un *early warning system* (Rossi et al., 2012; Thiebes et al., 2012; Segoni et al., 2014a; Calvello et al., 2015). Ad esempio in Rossi et al. (2012) viene descritto come a seguito della richiesta del Dipartimento Nazionale di Protezione Civile (DPC) al CNR-IRPI (Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica), di

creare e implementare un sistema di *early warning system* in grado di prevedere la possibile occorrenza di frane pluvio-indotte in Italia, sia stato sviluppato il metodo nominato SANF (Sistema di Allertamento Nazionale da Frane pluvio-indotte).

Quella proposta da Cannon e Hellen (1985) per la Baia di San Francisco, fu la prima soglia pluviometrica empirica implementata in un sistema di allertamento *real-time* che è stata successivamente descritta in Keefer et al. (1987) (Franceschini, 2012).

Un altro esempio di integrazioni di soglie pluviometriche in un sistema di allertamento regionale è stato realizzato nella regione Emilia Romagna, dove dal 2004 un gruppo di ricerca dell'Università di Firenze ha sviluppato il Modello SIGMA (Sistema Integrato Gestione Monitoraggio Allerta), più volte modificato negli anni più recenti (Martelloni et al., 2012; Lagomarsino et al., 2013), al fine di andare incontro alle necessità della Protezione Civile Regionale in merito alla gestione della pericolosità da frana con un singolo strumento (Segoni et al., 2015). Per definire la soglia il modello utilizzato, trascura i processi fisici che intergiscono tra i fenomeni franosi e l'evento di pioggia innescante, basandosi su un approccio di tipo statistico definito "*black box*" (Franceschini, 2012).

Nell'ambito dello sviluppo delle sopracitate soglie pluviometriche, una parte fondamentale che richiede un elevato sforzo in termini di tempo, è la validazione di un metodo statistico quanto più oggettivo possibile per l'identificazione delle condizioni pluviometriche che hanno determinato l'innescio franoso. Da un'attenta analisi bibliografica difatti, l'identificazione di tali condizioni risulta essere uno dei principali problemi nella definizione di soglie pluviometriche, in quanto la scelta del quantitativo di pioggia innescante viene spesso effettuata con procedure che risentono di un elevato grado di soggettività (Segoni et al., 2014a,b; Vessia et al., 2014; Melillo et al., 2014). Ciò significa che l'affidabilità dei risultati è strettamente correlata e condizionata dalla qualità e dalla disponibilità dei dati input (vedi par. 5.3).

5.1 Stato dell'arte

L'innescio di frane può essere causato da numerose azioni antropiche e da diversi fenomeni naturali. Come ampiamente discusso in letteratura, il principale fattore naturale per l'innescio di fenomeni franosi superficiali sono le precipitazioni (Glade et al., 2005; Sidle and Ochiai, 2006). A partire dal lavoro iniziale di Caine (1980), molti autori hanno tentato di determinare soglie pluviometriche empiriche di innescio di frane superficiali, le quali vengono definite come il livello di pioggia, l'umidità del suolo, o le condizioni idrologiche che, se raggiunte o superate,

cambiano le condizioni del sistema, innescando eventi di frana (White et al., 1996; Crozier 1997; Reichenbach et al. 1998; Guzzetti et al. 2007).

Le soglie vengono distinte in soglie fisicamente basate e soglie empiriche.

Le soglie fisicamente basate consistono nella modellazione fisica del pendio e nascono prendendo in considerazione la maggior parte dei parametri tipici del versante (es. parametri idrologici, geotecnici, morfologici, etc.), andando ad accoppiare al modello di stabilità (es. pendio infinito) un modello di infiltrazione, quale quello stazionario di Montgomery e Dietrich (1994), il modello a pistone di Green e Ampt (1911) o il modello diffusivo di Iverson (2000) (Iadanza, 2014). Le soglie fisicamente basate hanno notevoli limitazioni principalmente dovute alla loro complessità. Infatti anche i modelli più semplici richiedono informazioni spazialmente dettagliate sulle caratteristiche idrologiche, litologiche e morfologiche del suolo che controllano l'innescamento di frane. Il bisogno di una quantità elevata di dati per caratterizzare tutte le variabili del sistema, e il relativo costo per l'acquisizione degli stessi, fa sì che le soglie fisicamente basate possano essere applicate solo a scala di versante o di porzioni di bacino.

Le soglie empiriche si basano invece sulla relazione statistica tra due o più variabili pluviometriche che descrivono le condizioni in grado di innescare frane (es. intensità-durata, precipitazione cumulata d'evento-durata). Trattandosi di un approccio di tipo statistico, l'affidabilità dei risultati è però fortemente condizionata dalla disponibilità e qualità dei dati di input. Infatti, esse sono definite analizzando eventi di pioggia che in passato hanno innescato frane. Tali eventi sono caratterizzati da un quantitativo di pioggia, espressa in cumulata o in intensità, in un determinato intervallo di tempo, i cui valori vengono inseriti in un diagramma cartesiano, in base logaritmica o semi-logaritmica.

Riguardo il successivo inviluppo della soglia, per diversi autori (Lumb, 1975; Corominas and Moya, 1999; Zezere and Rodrigues, 2002; Giannecchini, 2005), essa rappresenta una linea che separa gli eventi pluviometrici non innescanti da quelli innescanti, nel caso in cui siano prese in considerazione nell'analisi anche gli eventi pluviometrici che non provocano frane. Crozier (1999) definisce la soglia come il limite superiore al di sopra del quale le frane occorrono sempre. Per altri autori (tra cui Caine, 1980; Guzzetti et al., 2007), considerando solo gli eventi innescanti, la soglia è definita come il limite inferiore sotto al quale eventi franosi non si verificano mai.

In passato dunque, nella maggior parte dei casi le soglie empiriche sono state disegnate manualmente senza seguire un criterio statistico rigoroso, oppure sono state definite attraverso l'adattamento ai minimi quadrati alla nuvola di dati (Iadanza, 2014). Il passo successivo era quello di traslare le stesse verso la parte bassa del diagramma cartesiano costruito, in modo da

rappresentare il limite inferiore dei dati empirici (Rappelli et al., 2008). Nell'ultimo decennio invece, si è cercato di ricavare le soglie con criterio statistico rigoroso, come ad esempio negli approcci di tipo bayesiano e/o frequentista, in modo da fornire un'analisi quantitativa delle intensità di precipitazione e delle probabilità di innesco, facendo sì che le stesse fossero oggettive e riproducibili (Guzzetti et al., 2008; Brunetti et al., 2010; Berti et al., 2012).

L'indubbio vantaggio delle soglie pluviometriche empiriche rispetto a quelle fisicamente basate è dunque quello di richiedere in input molti meno parametri, oltre alla possibilità di essere applicate a scale areali molto maggiori (regionale, nazionale, globale).

Per le finalità del dottorato ci si è dunque concentrati sulle soglie empiriche tentando di definire una soglia empirica regionale molisana integrata con dati della confinante regione Puglia.

5.1.1 Soglie pluviometriche empiriche

Per la definizione di soglie empiriche l'approccio più diffuso in letteratura sono le curve intensità-durata espresse dalla formula:

Equazione 5.1-1

$$I = c + \alpha \times D^{\beta}$$

in cui I è l'intensità media della pioggia, D è la durata, α l'intercetta della retta e β è il parametro che definisce la pendenza della retta. Dall'analisi della letteratura, l'esponente β assume sempre valori negativi, il che indica che se è inserita in un piano bi-logaritmico, all'aumento della durata corrisponde una diminuzione lineare dell'intensità di pioggia utile per l'innesco dei fenomeni franosi (Crosta e Frattini, 2001; Aleotti, 2004; Giannecchini, 2006; Guzzetti et al., 2008; Brunetti et al., 2009, 2010). Dalla letteratura analizzata si evince inoltre che il coefficiente c è pari a 0 mentre la curva I - D è descritta come una semplice legge di potenza.

La maggior parte delle soglie definite si dispone in un *range* di durata D tra 1 e 100 ore e di intensità tra 1 e 200 mm/ora (Franceschini, 2012). Nell'ambito del dottorato in oggetto, in collaborazione con il CNR-IRPI, è stato possibile costruire delle soglie empiriche basate sul metodo frequentista, grazie al quale è possibile definire soglie corrispondenti a differenti probabilità di superamento (Brunetti et al., 2010).

Guzzetti et al. (2007) furono i primi ad applicare il metodo Bayesiano per determinare soglie pluviometriche I - D , andando a normalizzare dati provenienti dall'Europa Centrale e meridionale. Con lo stesso metodo Guzzetti et al. (2008), hanno inoltre stabilito delle soglie dello stesso tipo I - D per l'innesco di sole frane e colate detritiche. Quest'ultima soglia è stata però normalizzata su scala globale. Con il metodo bayesiano, secondo gli autori, è infatti possibile valutare la scala e

la legge di potenza mediante approccio di tipo probabilistico, basato su valori di intensità e durata di precipitazione che hanno prodotto fenomeni franosi. L'approccio si basa sulla definizione della probabilità di Bernoulli ($0 \leq p \leq 1$, $p \in \mathbb{R}^+$) di un punto con intensità di precipitazione I e durata D come:

Equazione 5.1-2

$$P(I, D) \approx dbern[\mu(I, D)]$$

dove

Equazione 5.1-3

$$\mu(I, D) = \{(1 - \delta)\Theta[z(I, D)] + \delta\} \exp[-\eta|z(I, D)|]$$

Equazione 5.1-4

$$z(I, D) = 1 - \frac{\alpha \times D^{-\beta}}{I}$$

δ e η insieme misurano la dispersione dei dati attorno alla curva definita dal modello, e Θ è la funzione a gradino di Heaviside (Abramowitz e Stegun, 1972). In seguito ad alcuni *test* di verifica, i valori di tolleranza per la soglia ID sono stati posti a $\delta = 0.1$ e $\eta = 0.5$, mentre per α e β sono state assunte le seguenti distribuzioni di probabilità a priori, comunemente $1/\alpha \sim \text{dunif}[0.001, 100]$ e $1/\beta \sim \text{dunif}[0.1, 2]$ (Brunetti et al., 2010).

Una volta stimati i valori di α e β mediante il metodo di inferenza Bayesiana, gli stessi sono utilizzati per definire una soglia ID minima.

Il metodo frequentista propone invece di determinare l'intercetta α e la pendenza β della curva di potenza scelta attraverso un approccio di frequenza (Brunetti et al., 2010). L'analisi frequentista si basa sulle condizioni pluviometriche empiriche registrate che hanno prodotto dissesti. Nel metodo i valori di pioggia di D e I sono trasformati in scala logaritmica con il fine di evitare distorsioni dovute ai diversi ordini di grandezza in gioco. Infatti i valori di pioggia empirici, una volta identificati, sono plottati in un diagramma bi-logaritmico attraverso i quali viene successivamente creata una soglia mediante una regressione lineare ai minimi quadrati di tipo:

Equazione 5.1-5

$$\log(I) = A + B \times \log(D)$$

la quale equivale alla relazione di potenza di cui sopra. Successivamente per ogni evento di pioggia innescante, si calcola la differenza $\delta(D)$ tra il logaritmo dell'intensità dell'evento $\log(I(D))$ e il corrispondente valore della regressione di $D = \log(I_f(D))$:

Equazione 5.1-6

$$\delta(D) = \log(I(D)) - \log(I_f(D))$$

La densità di probabilità (pdf) della distribuzione di $\delta(D)$ è determinata attraverso la Kernel Density Estimation (Silverman, 1986; Scott, 1992; Venables and Ripley, 2002). Il risultato ottenuto è successivamente interpolato con una gaussiana col metodo dei minimi quadrati:

Equazione 5.1-7

$$\mathcal{F}(x) = a \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right)$$

dove $a>0$, $c>0$, e a , b , c sono reali. Infine, sulla base della distribuzione di $\delta(D)$ sono definite le soglie di innesco corrispondenti a differenti probabilità di eccedenza.

Più semplicemente, il metodo proposto da Brunetti et al. (2010) si basa sulle fasi di analisi semplificate in Figura 5.1-1. Nel metodo l'intercetta α e la pendenza β dell'equazione della soglia (Equazione 5.1-1) sono determinate attraverso un'analisi frequentista delle condizioni pluviometriche raccolte nel *database*. In una prima fase le coppie di durata e intensità (D, I) sono diagrammate in coordinate logaritmiche, e interpolate con una legge di potenza (Figura 5.1-1 A). Successivamente, per ogni singolo evento viene determinata la differenza algebrica tra i singoli valori di intensità e quello stimato dalla curva interpolante (Figura 5.1-1 B). Viene quindi stimata la funzione densità di probabilità degli scarti, successivamente modellata utilizzando una funzione Gaussiana (Figura 5.1-1 C). Infine, come riportato in Figura 5.1-1 (D), traslando l'intercetta α della curva interpolatrice di una quantità pari alla distanza tra la mediana della legge gaussiana che interpola gli scarti e il suo valore corrispondente alla probabilità desiderata, possono essere definite soglie a diversa probabilità di superamento.

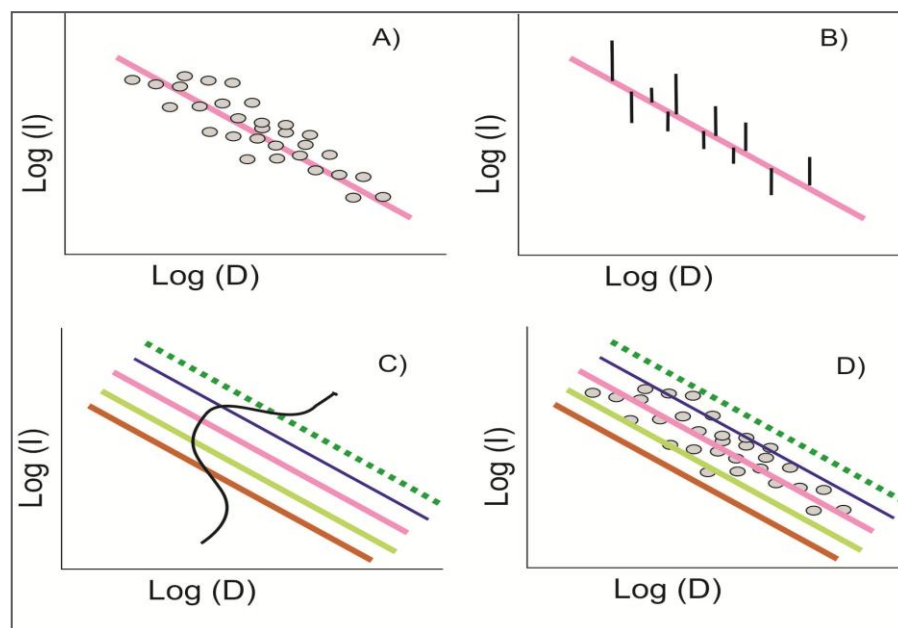


Figura 5.1-1 Step semplificati utilizzati nell'analisi frequentista proposto da Brunetti et al., 2010.

5.1.2 Soglie pluviometriche empiriche globali e nazionali

Come riferito nel paragrafo precedente, a prescindere dalle condizioni morfologiche, geologiche, di uso del suolo locale, e dei pattern di precipitazione locali, le soglie empiriche hanno lo scopo di determinare il limite inferiore sotto al quale l'innescio dei fenomeni non avviene mai. Molti autori a partire da Caine (1980), hanno tentato di costruire soglie pluviometriche adattabili a livello globale. Lo stesso Caine ottiene la propria soglia andando a graficare il limite inferiore a 73 eventi estremi di pioggia riconosciuti in diverse aree del mondo che hanno innescato colate di detrito e/o frane di tipo superficiali.

Innes (1983) usa un approccio del tutto simile ma definisce la propria soglia per tutti i tipi di frana. Jibson (1989) plotta nel piano D – I anche gli eventi di pioggia che non hanno provocato frane, ma per la costruzione della soglia usa come limite inferiore le precipitazioni innescanti.

La soglia proposta da Clarizia et al. (1996) viene costruita su fenomeni di versante attribuibili a *soil slips*. Crosta e Frattini (2001), invece creano una soglia iperbolica per la previsione di sole frane superficiali (Franceschini, 2012).

Soglie previsionali su eventi di *debris flows*, scatenatesi su superfici di terreno coinvolte antecedentemente da incendi vengono definite da Cannon e Gartner (2005), mentre Hong et al. (2006) furono i primi a proporre una soglia pluviometrica tenendo in considerazione i dati di pioggia satellitari (database multi-satellite NASA'S TRMM).

Nel 2007 Guzzetti et al., come già spiegato nel paragrafo precedente hanno cercato di superare la soggettività intrinseca alla definizione di soglie euristiche utilizzando un approccio statistico Bayesiano per definire i parametri α e β della soglia empirica (Equazione 5.1-1).

Tali soglie sono state ben riassunte da Franceschini, 2012 da cui si riporta la tabella modificata (Tabella 5.1-1), e hanno da un lato il vantaggio di poter essere applicate globalmente, ma d'altra parte presentano numerose limitazioni relative proprio all'eccessiva estensione, che genera intrinsecamente un numero elevato di falsi allarmi.

Tabella 5.1-1 Soglie pluviometriche globali e nazionali(modificata da Franceschini, 2012)

Autore	Tipo di frana utilizzata	Equazione prodotta
Caine (1980)	Debris flows; Frane Superficiali	$I = 14.82 \times D^{-0.39}$
Innes (1983)	Tutti i tipi	$I = 4.93 \times D^{-0.496}$
Jibson (1989)	Debris flows	$I = 30.53 \times D^{-0.57}$
Clarizia et al. (1996)	Frane Superficiali	$I = 10.00 \times D^{-0.77}$
Crosta e Frattini (2001)	Frane Superficiali	$I = 0.48 + 7.2 \times D^{-1.00}$
Cannon e Gartner (2005)	Debris Flows	$I = 7.00 \times D^{-0.60}$
Hong et al.(2006)	Debris flows; Frane Superficiali	$I = 12.45 \times D^{-0.42}$
Guzzetti et al. (2007)	Tutti i tipi	$I = 2.20 \times D^{-0.44}$

Per quanto riguarda la definizione di una soglia pluviometrica nazionale, Brunetti et al. (2010) utilizzano sia l'approccio Bayesiano che l'analisi frequentista, che risultano essere molto simili tra loro. Difatti la sola evidente differenza si può evincere, nel calcolo della durata degli eventi pluviometrici molto brevi (< 2 ore) dove la soglia realizzata mediante l'approccio di tipo Bayesiano risulta essere leggermente più bassa (vedi Figura 5.1-2).

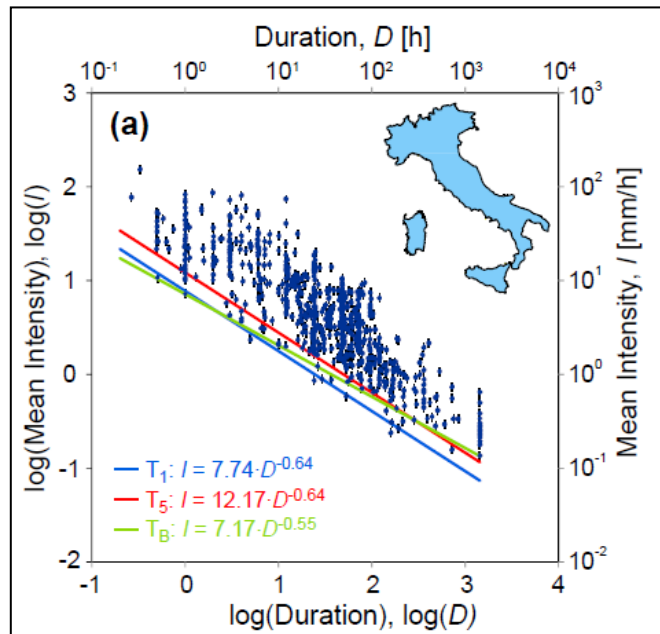


Figura 5.1-2 Soglia pluviometrica italiana realizzata con l'approccio Bayesiano (in verde) e con l'approccio frequentista a diverse probabilità di eccedenza (in blu 1%; rosso 5%) (Brunetti et al., 2010)

Le soglie realizzate da Brunetti et al. (2010) si basano su 587 eventi pluviometrici che hanno innescato frane nel periodo 1841-2008 (85% eventi al nord, 7,7% al centro e 7,3% al sud), derivati dalla revisione del primo catalogo realizzato da Guzzetti et al. (2008), a cui sono stati aggiunti altri 166 eventi relativo al periodo 2002-2009.

Un'ultima revisione e aggiornamento della soglia è stata inoltre presentata in Brunetti et al. (2015) e viene riportata in Figura 5.1-3, dove sono presi in considerazione 1981 eventi di pioggia distribuiti su tutto il territorio nazionale.

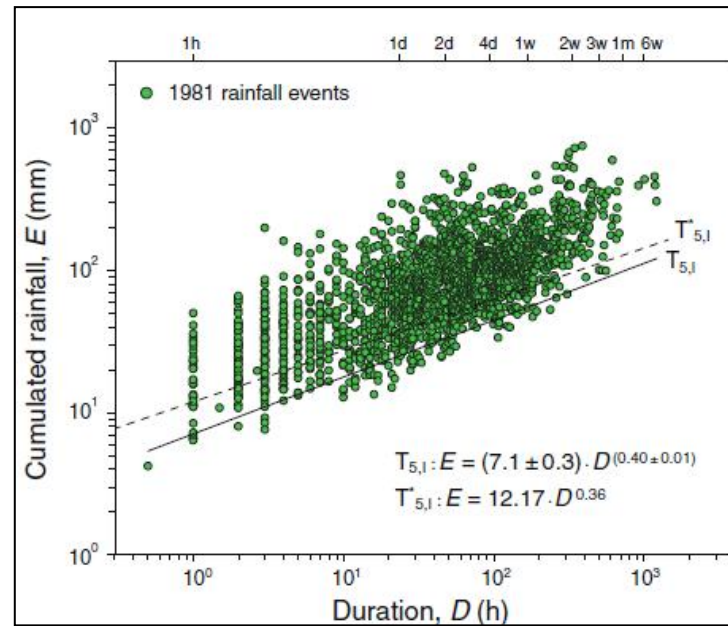


Figura 5.1-3 La linea continua rappresenta la nuova soglia pluviometrica italiana per probabilità di eccedenza superiore al 5%. La linea tratteggiata rappresenta la precedente soglia pluviometrica nazionale sempre espressa al 5% (Brunetti et al., 2015)

I dati del catalogo derivano da informazioni raccolte su eventi franosi innescati da pioggia avvenuti in passato in Italia, tramite la consultazione di diverse fonti di informazione, quali: fonti cronachistiche; sopralluoghi del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI); lavori prodotti dal CNR-IRPI; dati provenienti dal Servizio Protezione Civile; schede di intervento dei Vigili del Fuoco.

Il nuovo database è stato popolato dal Gennaio 1996 all'Agosto 2012 e per l'estrazione del relativo evento pluviometrico (durata e intensità media), è stato utilizzato il database dei pluviometri, del sistema nazionale della Protezione Civile, con misurazioni orarie o sub-orarie. Nella Figura 5.1-3, inoltre bisogna sottolineare come la nuova soglia realizzata è espressa dagli autori in termini di cumulata (E) e durata (D), semplicemente sostituendo nel metodo frequentista il termine dell'intensità (I) con la cumulata. Come visibile dalle leggi di potenza riportate in Figura 5.1-3, in Peruccacci et al. (2012), è stato statisticamente introdotto, attraverso la tecnica statistica del “*bootstrap*”, un errore nei parametri α e β di una soglia, che permette di definire una “fascia d'incertezza” intorno alla soglia ottenuta con i valori medi dei parametri. L'equazione completa delle soglie così determinate risulta quindi essere:

Equazione 5.1-8

$$E = (\alpha \pm \Delta\alpha) * D^{(\beta \pm \Delta\beta)}$$

in cui E è la pioggia cumulata, α è l'intercetta, e β è la pendenza. I parametri $\Delta\alpha$ e $\Delta\beta$ vengono definiti applicando il metodo statistico non parametrico del *bootstrap* (Efron, 1979;

Efron and Tibshirani, 1994), che consente di determinare l'incertezza relativa della soglia. Per approfondimenti sulla metodologia applicata si rimanda a Peruccacci et al. (2012).

5.1.3 Soglie pluviometriche empiriche regionali

Per quanto riguarda il solo territorio italiano, nel corso delle ultime due decadi sono state pubblicate numerose soglie regionali e sub-regionali. Le principali sono riportate in Tabella 5.1-2.

Tabella 5.1-2 Principali soglie italiane a scala regionale

Regione	Autore	Tipo di frana	Equazione soglia
Abruzzo, Italia	Brunetti et al. (2010)	Tutti (superficiali)	$I = 4.23 \times D^{-0.55}$ (metodo frequentista)
Abruzzo, Italia	Brunetti et al. (2010)	Tutti (superficiali)	$I = 5.54 \times D^{-0.59}$ (statistica Bayesiana)
Abruzzo, Marche, Umbria	Peruccacci et al., (2012)	Tutti (superficiali)	$E = 7.5 \pm 0.5 \cdot D^{(0.38 \pm 0.03)}$ (metodo frequentista)-(probabilità di eccedenza 5%)
Abruzzo	Peruccacci et al. (2012)	Tutti (superficiali)	$E = 6.4 \pm 1.2 \cdot D^{(0.42 \pm 0.05)}$ (metodo frequentista)-(probabilità di eccedenza 5%)
Marche	Peruccacci et al. (2012)	Tutti (superficiali)	$E = 8.6 \pm 0.8 \cdot D^{(0.35 \pm 0.02)}$ (metodo frequentista)-(probabilità di eccedenza 5%)
Umbria	Peruccacci et al. (2012)	Tutti (superficiali)	$E = 6.6 \pm 0.8 \cdot D^{(0.4 \pm 0.02)}$ (metodo frequentista)-(probabilità di eccedenza 5%)
Calabria, Italia	Vennari et al. (2014)	Tutti (superficiali)	$E = 5.8 \pm 0.8 \cdot D^{(0.41 \pm 0.03)}$ (probabilità di eccedenza 1%); $E = 8.6 \pm 1.1 \cdot D^{(0.41 \pm 0.03)}$ (probabilità di eccedenza 5%)-(metodo frequentista)
Campania, Italia	Guadagno (1991)	Debris Flows	$I = 176.40 \times D^{-0.90}$
Campania, Italia	Calcaterra et al. (2000)	Tutti	$I = 28.10 \times D^{-0.74}$
Campania (area penisola sorrentina), Italia	Piciullo et al., in press	Tutti (superficiali)	$E = 10.1 \pm 1.1 \cdot D^{(0.25 \pm 0.02)}$ (metodo frequentista)-(probabilità di eccedenza 5%)
Carinzia e Tirolo, Austria	Moser e Hohensinn (1983)	Frane superficiali	$I = 41.66 \times D^{-0.77}$
Lombardia, Italia	Ceriani et al. (1992)	Debris Flows	$I = 16.24 \times D^{-0.46}$
Lombardia, Italia	Ceriani et al. (1994)	Tutti (superficiali)	$I = 20.1 \times D^{-0.55}$
Piemonte, Italia	Aleotti (2004)	Frane Superficiali	$I = 19 \times D^{-0.50}$
Sicilia, Italia	Gariano et al. (2015)	Tutti (superficiali)	$E = (7.1 \pm 1.0) \cdot D^{(0.27 \pm 0.03)}$ (probabilità di eccedenza 1%); $E = (10.4 \pm 1.4) \cdot D^{0.27}$ (probabilità di eccedenza 5%)-(analisi di frequenza)

Nell'ambito del dottorato di ricerca, come vedremo nei paragrafi successivi, si è tentato di realizzare una soglia regionale molisana-pugliese, riguardante le aree della provincia di Campobasso e di Foggia. Molto utile sarà dunque confrontare la soglia ottenuta con quelle riportate in Tabella 5.1-1, con particolare riferimento a quelle limitrofe, Abruzzesi e Marchigiane, realizzate con lo stesso metodo di analisi.

5.2 Dati e metodologia utilizzati per la costruzione di una soglia pluviometrica molisana-pugliese

La definizione delle soglie pluviometriche può essere molto significativa nell'ambito dell'attività di ricerca di dottorato per la definizione di un *early warning system* per eventi franosi superficiali, essendo i fenomeni meteorologici in Italia tra i principali fattori di innesco.

La definizione di soglie pluviometriche empiriche per il possibile innesco di fenomeni franosi avviene essenzialmente attraverso tre distinte fasi (Loiacono et al., 2014):

1. Raccolta di informazioni relative ad eventi franosi pluvio-indotti;
2. Scelta del pluviometro di riferimento e ricostruzione dell'evento pluviometrico di innesco dell'evento franoso;
3. Analisi statistica frequentista degli eventi di pioggia e definizione della soglia.

È necessario quindi avere le informazioni inerenti la data in cui si è verificata la frana (giorno, mese, anno e, se possibile, anche l'ora), e conoscere il luogo in cui si è verificato il dissesto. Tali dati costituiscono la base necessaria per poter scegliere il pluviometro di riferimento più idoneo, che verrà utilizzato per l'estrazione e l'elaborazione dei dati pluviometrici relativi all'evento innescante.

Inoltre, per ogni evento franoso riconosciuto va determinato il quantitativo di pioggia responsabile dell'innescamento. Per la ricostruzione dell'evento pluviometrico dunque si prevede di individuare con esattezza il relativo momento di fine, che coincide con l'innescamento della frana, e di inizio dell'evento stesso. Quest'ultimo, in precedenza, veniva definito sulla base di una procedura euristica che considera un numero minimo di giorni non piovosi per separare due eventi di pioggia (Vennari et al., 2014).

Come verrà più lungamente trattato nel sottocapitolo successivo (5.3) uno degli obiettivi del lavoro di dottorato è stato proprio quello di validare e implementare un metodo automatico, precedentemente pubblicato in Vessia et al. (2014), in grado di simulare la decisione dell'esperto per la definizione delle condizioni pluviometriche che hanno determinato l'innescamento franoso. Tale

metodo automatico riproduce in maniera più oggettiva possibile i valori di cumulata e durata, che risultano essere uno dei problemi fondamentali nella realizzazione del *dataset* utile alla costruzione di una soglia.

L'utilità del metodo automatico consiste inoltre anche nel fatto che il suo utilizzo, una volta da noi validato, consente anche a personale non esperto un continuo aggiornamento dello stesso.

I risultati ottenuti dal processo di validazione hanno portato alla pubblicazione dell'articolo scientifico dal titolo "*Mimic expert judgement through automated procedure for selecting rainfall events responsible for shallow landslide: A statistical approach to validation*" pubblicato nel volume 86 della rivista *Computers & Geosciences*, pag. 146–153. doi:10.1016/j.cageo.2015.10.015

5.2.1 Raccolta dati e ricostruzione degli eventi pluviometrici innescanti fenomeni franosi

Al fine di definire una soglia pluviometrica per l'innescamento di fenomeni franosi nella macro-regione Molisana-Pugliese, sono state consultate diverse fonti d'informazione: pubblicazioni scientifiche, fonti cronachistiche (locali, regionali, nazionali, sia in stampa che *on-line*), verbali e relazioni di sopralluoghi del GNDICI (Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche), documenti prodotti dal CNR IRPI di Bari, documenti redatti dal Centro Funzionale Decentrato della Regione Puglia e le schede d'intervento dei Vigili del Fuoco dei comandi provinciali di Foggia e Campobasso. I dati così ottenuti sono stati raccolti in un database.

Tutte le segnalazioni infine sono state raccolte e inserite in un catalogo dove sono riportate le informazioni relative al tipo di fenomeno franoso, classificata in accordo con Cruden e Varnes (1996), a cui sono state associate altre informazioni riguardanti:

- dati pluviometrici;
- dati geografici della frana;
- tipologia della frana;
- accuratezza nella localizzazione spaziale (secondo tre classi di precisione geografica);
- accuratezza temporale (Oraria-Fascia oraria-Giornaliera);
- fonti di provenienza dell'informazione.

Queste informazioni sono necessarie per selezionare il pluviometro più rappresentativo dell'evento pluviometrico innescante, e per riconoscere con esattezza oraria o almeno giornaliera

il momento di accadimento del fenomeno, al fine di poter identificare i parametri pluviometrici caratteristici dell'evento stesso.

Come descritto in Loiacono et al. (2014) e Pisano et al. (2015), nel database erano già presenti 22 eventi pluviometrici che avevano innescato 52 fenomeni franosi superficiali. Questi sono stati messi a disposizione da parte del CNR-IRPI di Bari, per la costruzione successiva della soglia nel contesto molisano-pugliese.


Nel corso del dottorato, con la collaborazione del Centro Funzionale Decentrato di Protezione Civile della Regione Puglia, sono stati inoltre analizzati in un primo momento 136 documenti contenenti possibili informazioni su eventi franosi che si aggiungono ai 252 documenti che derivavano dai precedenti dati esistenti per il Sub-Appennino Dauno (Parise et al., 2015). Dei 136 documenti analizzati 42 documenti provengono dalle schede ricevute dal comando dei VVFF della provincia di Campobasso (vedi esempio Figura 5.2-1) relative agli anni 2000-2014, 16 sono state ricevute dal comando dei VVFF di Foggia, per gli anni 2012-2014, mentre 68 schede di rilevamento provenienti dalle attività di liberi professionisti geologi in riferimento all'evento del Settembre 2014 nell'area Garganica, intervenuti a seguito dell'allertamento avuto dal Servizio di Protezione Civile, sulla base di un Protocollo di intesa tra l'Ordine Regionale dei Geologi ed il Servizio Protezione Civile della Regione Puglia.

A questi documenti vanno aggiunte le segnalazioni ottenute tra il finire dell'anno 2015 e i primi sei mesi del 2016, relative a 52 documenti, 28 dei quali derivanti dalle schede ricevute dal comando dei VVFF della provincia di Campobasso relative agli anni 2014-2015, mentre 24 da fonti cronachistiche ottenute via web.


Il numero delle segnalazioni si è ridotto notevolmente nel corso delle elaborazioni, in quanto i dati raccolti devono fornire precise informazioni su ogni singolo evento e devono seguire dei precisi criteri di compatibilità, così come descritti in Peruccacci et al. (2012) e Vennari et al. (2014).

Modello VF41

Modulario VF Automatizzato



MINISTERO DELL'INTERNO



CORPO NAZIONALE DEI VIGILI DEL FUOCO

SCHEDA STATISTICA - RAPPORTO D'INTERVENTO

Scheda 2427/1

Data 26/09/2006

Scheda Altro Comando

Comando CAMPOBASSO

CB

Sede Servizio Termoli

2000

DATI INTERVENTO

DATA 26/09/2006

Ore 19

Minuti 01

CHIAMATA

26/09/2006

Ore 19

Minuti 02

USCITA DALLA SEDE

26/09/2006

Ore 19

Minuti 10

ARRIVO SUL LUOGO

26/09/2006

Ore 19

Minuti 30

PARTENZA DAL LUOGO

26/09/2006

Ore 19

Minuti 40

RIENTRO IN SEDE

Km 10

DISTANZA

LUOGO 192

STRADE E/O PIAZZE CITTADINE

TIPOLOGIA 18

VALANGHE E FRANE

SOSTANZE MATERIALI INTERESSATI 95

TERRA IN GENERE

CAUSE PRESUNTE 30

IN GENERE -PIOGGIA VENTO NEVE ECC.-

INTERVENTO DI PIU' SQUADRE ☐

PROVENIENZA DA ALTRO INTERVENTO ☐

SUBENTRO A SERVIZIO INIZIATO ☐

ALL'APERTO ☐

DATI PREVENZIONE

IN POSSESSO C.P.I. ☐

IN POSSESSO N.O.P. ☐

ATTIVITA' SOGGETTE NORME D.P.R. 151 del 2011 ☐

DATI GENERALI

TERMOLI

COMUNE-FRAZIONE

VIA F. DE SANCTIS

VIA-PIAZZA

PROV. CB

CODICE COMUNE 70078

PROVINCIA FUORI ZONA

N° CIVICO

N° PIANO FUORI TERRA

N° PIANO INTERATO

RELAZIONE D'INTERVENTO

All'arrivo sul posto, la situazione risultava la seguente

In via De Sanctis c'era stato uno scivolamento di terreno da una ripa a causa delle forti piogge, ma che comunque interessava parzialmente la circolazione. Si avvisavano pertanto i vigili urbani di far mettere alcuni segnali di rallentamento onde evitare qualsiasi pericolo a veicoli e persone in transito.

Figura 5.2-1 Stralcio di una scheda-rapporto d'intervento dei VVFF del Comando di Campobasso, in cui sono evidenziati tutti gli elementi utili al riconoscimento dell'evento, data di accadimento, tipologia di fenomeno, localizzazione e delle cause principali (tratto da Pisano et al., 2015).

Infatti, i motivi per i quali un evento franoso viene eliminato possono essere molteplici: incompletezza nell'informazione della data di occorrenza, dei dati pluviometrici, assenza di pioggia nel giorno della frana e/o nei giorni antecedenti, oppure presenza di neve. Tutte queste motivazioni non consentono di avere le informazioni sufficienti e necessarie per poter ricostruire l'evento di pioggia innescante la frana, e costringono pertanto ad eliminare l'evento franoso.

Inoltre, sono stati eliminati dal database realizzato per la costruzione della soglia anche i dati riguardanti le frane profonde, cioè quelle frane che coinvolgono anche gli strati al di sotto della coltre di alterazione e che possono avere la superficie di scorrimento ad una profondità anche di decine di metri, e tutte quelle situazioni in cui vi è chiaramente la presenza di elementi antropici (es. muri di sostegno), e per le quali quindi l'innesco della frana non può essere imputato alla sola pioggia. Va anche evidenziato che un evento di pioggia può innescare uno o più fenomeni franosi; quindi, a più frane può essere associato un unico evento pluviometrico, se il momento d'innesco ed il pluviometro di riferimento coincidono.

Detto ciò, nel complesso erano stati analizzati 188 documenti e solo 139 segnalazioni di frana innescate da pioggia dal 1950 al 2016 sono state inserite nei cataloghi e sottoposte al processo di validazione finale, nonché alla ricostruzione dell'evento pluviometrico innescante.

Di queste, solo 62 hanno superato il processo di validazione finale, realizzato da una terza persona esterna, estranea alla raccolta del dato grezzo, che ha valutato la completezza dell'informazione del dato, utile da rendere l'archivio realizzato il più omogeneo e rispondente agli stringenti criteri descritti in precedenza.

Il lavoro di ricostruzione degli eventi innescanti ha riguardato l'elaborazione dei dati pluviometrici orari forniti dal Servizio Protezione Civile della Regione Puglia. È stato necessario procedere ad un preventivo lavoro di ri-organizzazione e di omogeneizzazione del dato nei singoli *files*. Tale operazione si è resa indispensabile per procedere alle successive elaborazioni al fine di definire il quantitativo di pioggia necessario ad innescare ogni singolo evento di frana.

Per ogni singolo evento pluviometrico sono stati definiti i valori di pioggia cumulata E (mm), della durata di pioggia D (h) e della intensità di pioggia I (mm/h).

Inoltre ogni singolo evento franoso è stato georeferenziato utilizzando Google Earth© (Figura 5.2-2), tenendo in considerazione l'accuratezza con cui è stata localizzata la frana.



Figura 5.2-2 Localizzazione dei 123 eventi franosi.

Bisogna sottolineare inoltre che per la raccolta dati nel territorio regionale pugliese, grazie alla collaborazione con il Servizio Regionale della Protezione Civile è stato possibile recuperare dati di frane con relativo dato pluviometrico precedenti agli anni 90.

Difatti alcuni eventi segnalati precedentemente agli anni 90, sono stati ritenuti affidabili per l'archivio. A seguito del loro riconoscimento, si è andato infine a verificare quali fossero i

pluviometri di riferimento più idonei, che successivamente sono stati utilizzati per l'estrazione e l'elaborazione dei dati pluviometrici.

Sono stati così recuperati i pluviogrammi cartacei di interesse (Figura 5.2-3), che sono stati trascritti in formato digitale. Il passaggio dal formato cartaceo al digitale è avvenuto riportando la quantità di pioggia oraria in un foglio elettronico, avvalendosi del software MS-Excel®, per una durata di almeno 3/4 settimane antecedenti l'innesco del fenomeno franoso segnalato (Figura 5.2-4).

Come visibile in Figura 5.2-4, ogni intervallo digitalizzato riporta nel foglio elettronico di calcolo il pluviometro di riferimento, la data e l'ora del rilevamento del dato pluviometrico, la durata, la quantità oraria, l'intensità oraria e la cumulata (Parise et al., 2015).

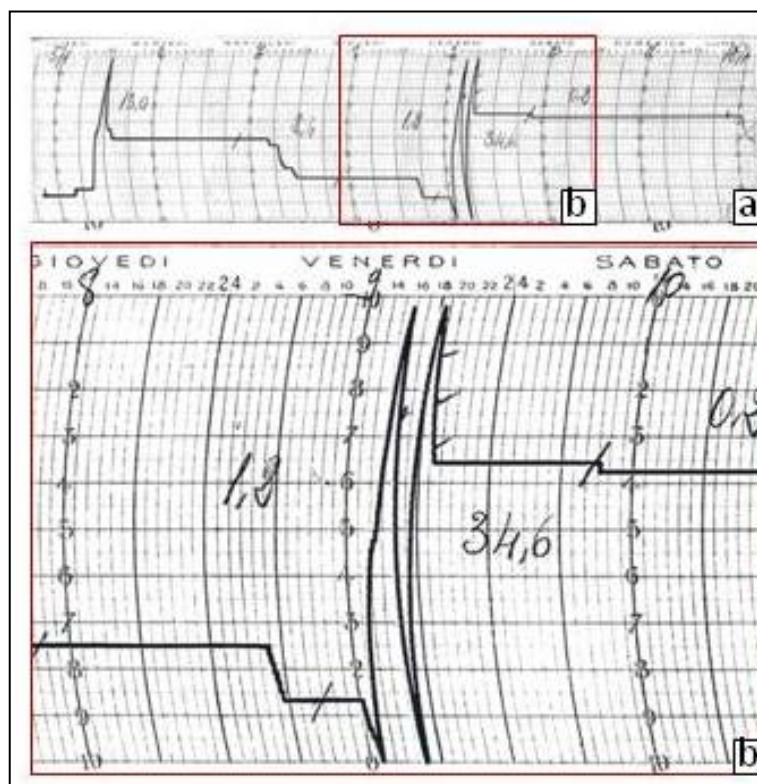


Figura 5.2-3 **a)** Esempio di pluviogramma cartaceo estratto dagli archivi del Servizio della Protezione Civile della Regione Puglia. **b)** Ingrandimento di una parte del pluviogramma (modificato da Pisano et al., 2015).

Pluviometro	Data rilevamento	Durata (h)	Quantita' (mm)	intensità (mm)	Cumulata
Pietramontecorvino	21/07/1976 16.00.00	1	3,00	3,00	3,00
Pietramontecorvino	21/07/1976 17.00.00	1	0,00	0,00	3,00
Pietramontecorvino	21/07/1976 18.00.00	1	0,00	0,00	3,00
Pietramontecorvino	21/07/1976 19.00.00	1	0,00	0,00	3,00
Pietramontecorvino	21/07/1976 20.00.00	1	0,00	0,00	3,00
Pietramontecorvino	21/07/1976 21.00.00	1	0,00	0,00	3,00
Pietramontecorvino	21/07/1976 22.00.00	1	0,00	0,00	3,00
Pietramontecorvino	21/07/1976 23.00.00	1	0,00	0,00	3,00
Pietramontecorvino	22/07/1976 00.00.00	1	0,00	0,00	3,00
Pietramontecorvino	22/07/1976 01.00.00	1	0,00	0,00	3,00
Pietramontecorvino	22/07/1976 02.00.00	1	0,00	0,00	3,00
Pietramontecorvino	22/07/1976 03.00.00	1	0,00	0,00	3,00
Pietramontecorvino	22/07/1976 04.00.00	1	0,00	0,00	3,00
Pietramontecorvino	22/07/1976 05.00.00	1	0,00	0,00	3,00
Pietramontecorvino	22/07/1976 06.00.00	1	0,00	0,00	3,00
Pietramontecorvino	22/07/1976 07.00.00	1	0,00	0,00	3,00

Figura 5.2-4 Esempio di foglio di calcolo in cui vengono riportati digitalmente i dati di pioggia letti dai pluviogrammi cartacei (modificato da Pisano et al., 2015).

Per i fenomeni franosi per i quali sono note l'ora e la data di occorrenza, il momento di fine dell'evento pluviometrico coincide con l'ora in cui si è verificata la frana o con l'ora in cui la pioggia è cessata (nel caso in cui la frana si sia innescata successivamente alla fine della pioggia). Per identificare il momento di fine dell'evento pluviometrico è sorta l'esigenza di individuare un criterio per separare eventi pluviometrici successivi.

A tal fine, in attesa della validazione del metodo automatico realizzato da Vessia et al. (2016; si veda anche il paragrafo successivo), per l'individuazione dell'evento pluviometrico innescante, si è scelto di utilizzare un criterio basato sull'individuazione di un periodo minimo di giorni senza pioggia. Tale periodo varia da due giorni (per eventi pluviometrici verificatisi da maggio a settembre) a quattro (per eventi pluviometrici verificatisi da ottobre ad aprile) per considerare il differente regime climatico esistente tra mesi estivi e invernali, responsabile dell'innescamento di fenomeni franosi (Peruccacci et al., 2012).

L'iniziale quantitativo di segnalazioni di frana raccolto si è notevolmente ridotto per i motivi sopracitati e nel complesso 81 fenomeni franosi pluvio indotti sono stati inseriti nei cataloghi. Gli 81 fenomeni franosi erano stati causati da 35 eventi pluviometrici avvenuti nell'area molisana-pugliese. In definitiva ai 22 eventi precedentemente raccolti, sono stati aggiunti 35 eventi, con dato finale complessivo che raggiunge i 57 eventi pluviometrici responsabili dell'innescamento di 123 fenomeni franosi (Figura 5.2-2).

Come detto in precedenza, il numero degli eventi franosi non coincide con il numero degli eventi pluviometrici perché un singolo evento di pioggia può innescare uno o più fenomeni franosi.

Anche se il database si attesta su un numero di eventi molto scarso (57), per avvalorare la buona raccolta dati effettuata nell'ambito della ricerca sono stati confrontati il numero delle segnalazioni utili in rapporto all'estensione areale di indagine, in confronto a regioni limitrofe

quali Abruzzo, Marche, Umbria, Calabria i cui dati sono già stati pubblicati in precedenti lavori (Peruccacci et al., 2012; Vennari et al., 2014). Nel complesso difatti, i valori di densità di eventi riconosciuti per Km² e utili alla definizione della soglia, nella nostra area di studio sono superiori a quello della confinante regione Abruzzo e leggermente inferiori alla Calabria (vedi Tabella 5.2-1). Valori più che doppi invece si registrano per le regioni Umbria e Marche, il che è probabilmente legato alla differente disponibilità di informazioni usate per compilare i cataloghi, ed ai differenti criteri adottati per determinare le condizioni di pioggia che hanno scatenato i fenomeni franosi (Vennari et al., 2014).

Tabella 5.2-1 Numero di eventi franosi utili, in relazione all'estensione dell'area di indagine

Area di studio	Estensione areale (Kmq)	Numero eventi	Eventi per per 1000 Kmq
Molise (Prov_Cb) Puglia (Sub-Appennino Dauno e Gargano)	(2900+2108+2100)= 7108	57	8,02
Abruzzo (Peruccacci et al., 2012)	10790	84	7,78
Marche (Peruccacci et al., 2012)	9690	188	19,40
Umbria (Peruccacci et al., 2012)	8456	170	20,10
Calabria (Vennari et al. 2014)	15080	186	12,33

5.2.2 Definizione della soglia pluviometrica

La soglia pluviometrica definita con il metodo frequentista, come già riportato nell'Equazione 5.1-8, ha la seguente espressione:

Equazione 5.2-1

$$E = (\alpha \pm \Delta\alpha) * D^{(\beta \pm \Delta\beta)}$$

in cui E è la pioggia cumulata, α è l'intercetta, e β è la pendenza ed i parametri $\Delta\alpha$ e $\Delta\beta$ determinano il range di incertezza associato.

Attualmente il catalogo dati degli eventi franosi superficiali pluvio-indotti, osservati nell'area molisana-pugliese, contiene 57 eventi pluviometrici responsabili dell'innescò di 123 frane superficiali, i cui *range* di durata di innescò ricadono nell'intervallo tra le 3h e le 195h, mentre le cumulate calcolate ricadono tra 13,2 mm e 468,8 mm. In Tabella 5.2-2 si riportano le informazioni essenziali, relative agli eventi pluviometrici che hanno innescato frane superficiali, utilizzate per la realizzazione della soglia pluviometrica.

Tabella 5.2-2 I 57 eventi pluviometrici responsabili dell'innesco di 123 frane superficiali avvenute nell'area di analisi. *Legenda: ID_Progetto=identificativo alfanumerico dell'evento pluviometrico ricostruito, ID_Fra=identificativo dell'evento franoso; NomePluvRif=nome del pluviometro utilizzato per l'estrazione dei dati di pioggia; Comune e Provincia interessate dalla frana; Giorno-Mese-Anno-Ora d'innesco della frana; durata (D),cumulata (C), intensità (I) .*

ID_Progetto	ID_Fra	NomePluvRif	Comune	Provincia	Giorno	Mese	Anno	Ora/Ora Desunta	D	I	C
MOL_0001	a	Termoli	Termoli	CB	11	9	2010	05:00:00	25,0	2,3	58,1
MOL_0004	a	Termoli	Termoli	CB	22	10	2003	21:00	177,0	0,8	143,3
MOL_0008	a	Palata	Montenero di Bisaccia	CB	25	1	2003	11:00:00	42,0	3,6	149,4
MOL_0009	a	Palata	Acquaviva Collecroci	CB	25	1	2003	02:00:00	33,0	3,0	99,6
MOL_0010	a	Bonefro	Monacilioni	CB	25	1	2003	16:00:00	43,0	5,0	213,8
MOL_0011	a	Castelmauro	Castelmauro	CB	26	1	2003	19:00	53,0	2,8	147,0
MOL_0014	a	Termoli	Termoi	CB	16	10	2003	17:00:00	15,0	5,9	89,0
MOL_0021	a	Termoli	Termoli	CB	26	9	2006	19:00:00	20,0	2,6	51,2
MOL_0030	a	Lucito	Castropignano	CB	6	3	2015	22:00:00	36,0	2,86	103,0
MOL_0031	a	Trivento	Fossalto	CB	6	3	2015	10:00	52,0	1,07	55,80
MOL_0035	a	Bonefro	Bonefro	CB	13	3	2016	08:00:00	19,00	1,1	21,2
MOL_0037	a	Bonefro	Castellino del Biferno	CB	2	12	2013	23:59:00	54,00	2,5	136,2
MOL_0038	a	Termoli	Guglionesi	CB	27	11	2015	19:00:00	39,0	2,69	105,0
MOL_0040	a	Castelmauro	Trivento	CB	26	2	2015	22:00	35,0	0,55	19,4
MOL_0041	a	Gambatesa	Riccia	CB	2	12	2013	23:59:00	55,0	1,73	95,2
MOL_0042	a	Termoli	Termoli	CB	6	3	2015	16:00:00	31,0	1,79	55,4
MOL_0043	a	Bonefro	Montorio nei Frentani	CB	2	12	2013	17:00	47,0	2,58	121,2
MOL_0044	a	Termoli	Portocannone	CB	2	12	2013	15:00	33,0	2,82	93,2
PUGL_0003	a	Alberona	Alberona	FG	4	5	2011	8:00	195,0	0,6	111,6
PUGL_0005	a	Irsina	Altamura	BA	8	9	2003	5:00	3,0	11,2	33,6
PUGL_0008	a	Gambatesa	Celenza Valfortore	FG	26	1	2003	23:59	110,0	1,3	137,8
PUGL_0011	a	Bovino	Bovino	FG	12	1	1997	23:59:00	187,0	0,5	99,4
PUGL_0012	a	Rocchetta Scalo	Rocchetta Sant'Antonio	FG	5	5	1998	23:59:00	39,0	1,0	40,4
PUGL_0013	a	Sant'Agata	Sant'Agata di Puglia	FG	16	6	2000	23:59:00	5,0	26,8	134,2
PUGL_0015	a	Pietramontecorvino	Pietramontecorvino	FG	24	1	2003	23:59:00	24,0	2,1	50,4
PUGL_0022	a	Bovino	Panni	FG	4	4	2008	18:30:00	45,0	0,6	25,0
PUGL_0024	a	Anzano	Anzano di Puglia	FG	7	3	2009	23:59:00	68,0	1,3	85,8
PUGL_0025	a	Faeto	Celle di San Vito	FG	7	3	2009	15:00:00	132,0	1,0	127,6
PUGL_0026	a	Deliceto	Deliceto	FG	7	3	2009	23:59:00	63,0	0,7	45,2
PUGL_0027	a	Monteleone di Puglia	Monteleone di Puglia	FG	7	3	2009	23:59:00	74,0	1,2	89,0
PUGL_0030	a	Pietramontecorvino	Pietramontecorvino	FG	7	3	2009	23:59:00	74,0	1,0	73,8
PUGL_0031	a	Biccari	Biccari	FG	21	4	2009	18:00:00	60,0	1,8	110,4
PUGL_0032	a	Pietramontecorvino	Carlantino	FG	21	4	2009	23:59:00	10,0	3,0	30,2
PUGL_0035	a	Monteleone di Puglia	Monteleone di Puglia	FG	5	4	2011	23:59	6,0	4,9	29,4
PUGL_0036	a	Orto di Zolfo	Roseto Valfortore	FG	21	4	2009	19:30:00	19,0	7,3	139,2
PUGL_0037	a	Troia	Troia	FG	21	4	2009	17:30:00	35,0	2,8	99,2
PUGL_0042	a	Alberona	Roseto Valfortore	FG	24	10	2009	22:00:00	61,0	1,3	80,6

PUGL_0047	a	Bovino	Bovino	FG	17	9	1966	23:59:00	47,0	0,6	30,4
PUGL_0048	a	Troia	Troia	FG	29	12	1976	23:59:00	6,0	2,2	13,2
PUGL_0053	a	Pietramontec orvino	Castelnuovo della Daunia	FG	25	1	1955	23:59:00	50,0	3,8	187,8
PUGL_0054	a	Pietramontec orvino	Castelnuovo della Daunia	FG	26	3	1962	23:59:00	46,0	0,5	24,2
PUGL_0055	a	Pietramontec orvino	Volturara Appula	FG	17	2	1963	23:59	18,0	1,5	26,4
PUGL_0056	a	Pietramontec orvino	Volturara Appula	FG	25	7	1976	23:59:00	17,0	2,2	38,2
PUGL_0059	a	Pietramontec orvino	Volturara Appula	FG	25	1	1977	23:59:00	41,0	0,7	30,6
PUGL_0060	a	Monteleone di Puglia	Monteleone di Puglia	FG	19	2	1979	23:59:00	174,0	0,6	101,0
PUGL_0061	a	Sant'Agata di Puglia	Sant'Agata di Puglia	FG	19	2	1979	23:59:00	38,0	1,0	38,2
PUGL_0062	a	San Giovanni Rotondo	San Giovanni Rotondo	FG	4	9	2014	21:00:00	77,0	6,1	468,8
PUGL_0063	a	San Marco in Lamis	San Marco in Lamis	FG	4	9	2014	02:00:00	66,0	5,7	374,6
PUGL_0064	a	VicoDelGar gano	Ischitella	FG	6	9	2014	05:00:00	116,0	2,3	270,6
PUGL_0069	a	Cagnano Varano	Cagnano Varano	FG	4	9	2014	16:00:00	73,0	4,0	293,2
PUGL_0071	a	Volturino	Volturino	FG	14	2	2013	17:00	39,0	0,7	27,2
PUGL_0072	a	Deliceto	Deliceto	FG	1	12	2013	12:00:00	19,0	2,9	55,4
PUGL_0073	a	San Marco in Lamis	San Marco in Lamis	FG	3	2	2014	03:00:00	58,0	0,9	50,4
PUGL_0074	a	Deliceto	Deliceto	FG	2	10	2014	18:00	3,0	9,4	28,2
PUGL_0075	a	Bovino	Bovino	FG	18	3	2016	17:00:00	26,0	2,01	52,2
PUGL_0076	a	Panni	Panni	FG	2	12	2013	23:59	57,0	5,71	325,2
PUGL_0077	a	Faeto	Faeto	FG	15	10	2015	05:00:00	9,0	14,53	130,8

Inoltre in Tabella 5.2-3 sono riportate le principali statistiche descrittive degli eventi pluviometrici che hanno indotto almeno un fenomeno franoso. Dei 57 eventi pluviometrici scatenanti, 39 sono occorsi tra Novembre e Marzo mentre solo 18 nel periodo più caldo tra Aprile e Ottobre, 18 appartengono al contesto molisano mentre 39 al contesto pugliese. Gli eventi di pioggia nel periodo tra Novembre e Marzo hanno durate che si distribuiscono tra le 3 e le 187 ore, provocando l'innescarsi di fenomeni franosi con medie di durata leggermente superiori rispetto ai mesi estivi. Inoltre i fenomeni franosi delle aree pugliesi sembrano innescarsi mediamente dopo eventi di pioggia più lunghi rispetto a quelli molisani.

Per quel che riguarda le intensità di pioggia innescanti, è da sottolineare come nei periodi estivi i valori sono quasi doppi rispetto a quelli invernali sia nei valori massimi che nella media. Dall'analisi dei valori di cumulata si evince come per il periodo estivo sia necessario un quantitativo di pioggia molto superiore rispetto ai mesi invernali. Ciò significa che le condizioni di umidità dei terreni affioranti nell'area, porta durante l'inverno all'innescarsi di fenomeni franosi per valori più bassi rispetto a quelli estivi.

Tabella 5.2-3 Principali statistiche descrittive degli eventi pluviometrici innescanti analizzati.

	Numero di frane totali	D (ore)			I (mm/ore)			C (mm)		
		Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media
Intero catalogo	57(123)	195	3	52,61	26,8	0,5	3,22	468,8	13,2	102,92
Periodo Invernale (Novembre-Marzo)	39	187	3	54,89	14,53	0,5	2,5	325,2	13,2	90,46
Periodo Estivo (Aprile-Ottobre)	18	195	3	47,67	26,8	0,6	4,77	468,8	25	129,91
Eventi Molise	18	177	15	44,94	5,9	0,6	2,54	213,8	19,40	97,61
Eventi Puglia	39	195	3	56,15	26,8	0,5	3,5	468,8	13,2	105,36

L'analisi mediante il metodo frequentista dei 57 dati riconosciuti ha portato alla costruzione di soglie a differenti percentuali di superamento, le quali sono riportate in Figura 5.2-5. All'interno delle singole figure sono inoltre riportate le singole relative equazioni che evidenziano gli elevati valori dell'incertezza relativa della soglia ($\Delta\alpha$ e $\Delta\beta$), dato lo scarso numero di eventi ricostruiti. Sulla base dei lavori sinora pubblicati, il numero minimo di eventi pluviometrici, necessario a definire soglie con un'incertezza relativa inferiore al 10%, e quindi utilizzabili in sistemi di allertamento, è pari infatti a 175 (Peruccacci et al., 2012; Brunetti et al., 2015).

Ad ogni modo, seppur la soglia sembra essere affetta ancora da una elevata incertezza, si è proceduto al confronto con le soglie ottenute e pubblicate sia a scala nazionale (Brunetti et al., 2015), che con altre soglie a carattere regionale, già esplicitate in tabella come quella di Marche e Abruzzo (Peruccacci et al., 2012).

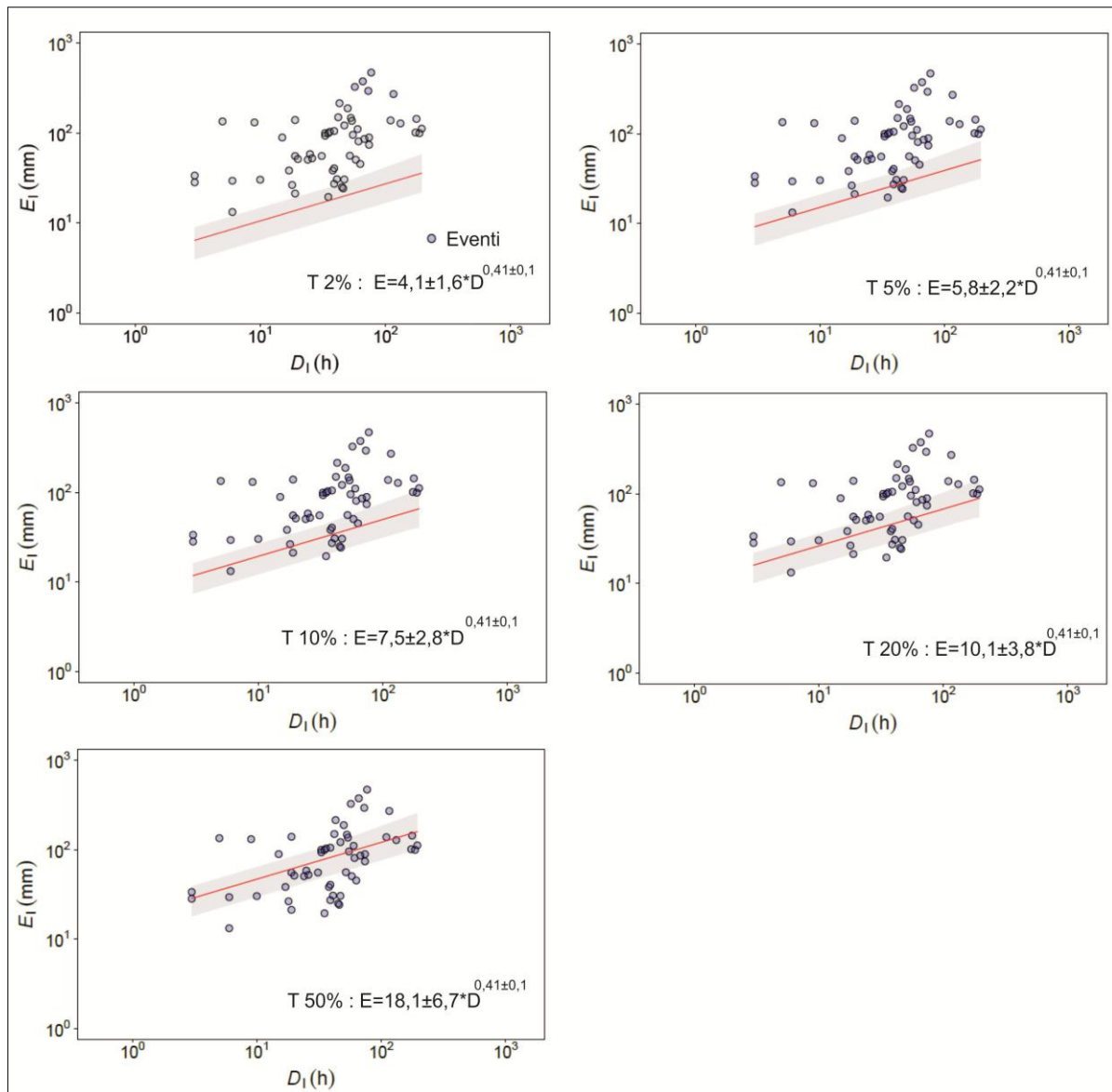


Figura 5.2-5 Grafici bi-logaritmici di cumulata e durata riportanti gli eventi pluviometrici responsabili dell'innescio di frane nell'area appartenente alle province di Campobasso e Foggia. I diversi grafici riportano le soglie realizzate per differenti percentuali di eccedenza.

Prendendo come riferimento la probabilità di eccedenza al 5% in Figura 5.2-6 viene riportato il confronto tra la soglia molisano-pugliese e quella nazionale, dal quale si evince come la soglia definita nel contesto molisano-pugliese risulti leggermente inferiore rispetto a quella nazionale, che comunque ricade nell'ampio intervallo di incertezza riconosciuto.

Detto ciò, trascurando l'incertezza associata, dall'analisi dei termini α (intercetta) e β (pendenza), si evince che la grande differenza risiede soprattutto nel primo termine α , il che vuol dire che la differenza in termini di quantità di pioggia per l'innescio di fenomeni franosi è costante, indipendentemente dall'intervallo di durata presa in considerazione.

Questo dimostra come, nel contesto molisano-pugliese, l'accadimento di fenomeni franosi relazionati alla sola pioggia sembra avvenire mediamente per valori di pioggia leggermente

minori rispetto al contesto nazionale, il che è comunque associabile alla grande eterogeneità del database costruito su scala nazionale, in cui i fenomeni franosi associati si innescano in condizioni climatiche, fisiografiche e litologiche molto differenti tra loro.

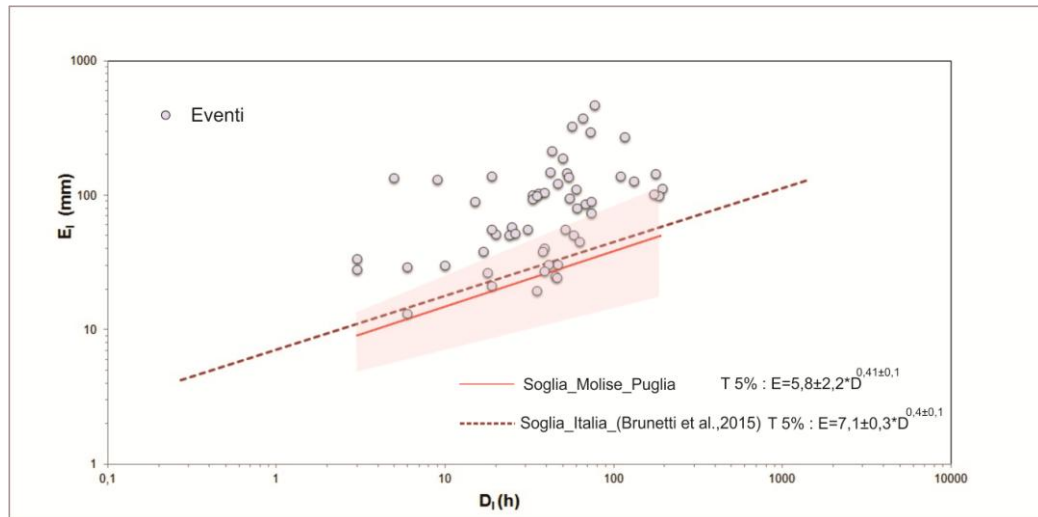


Figura 5.2-6 Confronto tra soglia definita con il database completo nazionale da Brunetti et al. (2015) e soglia definita nel contesto molisano-pugliese. In ombreggiato il range di incertezza.

In ultimo, confrontando la soglia con probabilità di eccedenza al 5% ($T=5\%$) dell'area molisana-pugliese con quella di regioni limitrofe come l'Abruzzo e le Marche (vedi Figura 5.2-7), è possibile notare che, seppur anche in questo caso più bassa soprattutto nel termine α dell'intercetta, la soglia molisana-pugliese è molto vicina e simile a quella abruzzese, mentre in confronto a quella marchigiana è caratterizzata da una discreta discrepanza. Quest'ultima può essere spiegata dalle differenti litologie tra le aree in questione.

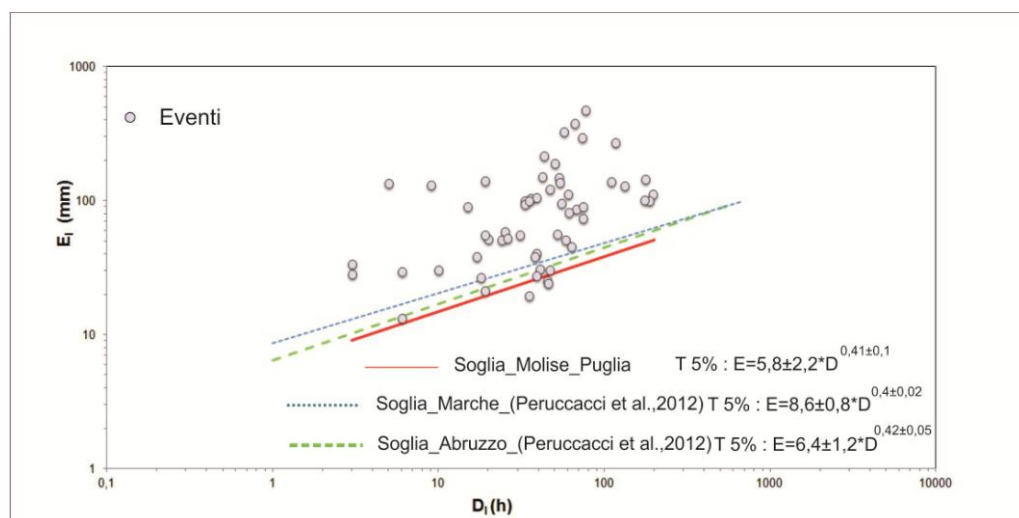


Figura 5.2-7 Confronto tra soglia definita nella regione Marche (tratteggiata in blu), soglia definita nella regione Abruzzo (tratteggiata in verde) (Peruccacci et al., 2012) e soglia definita nel contesto molisano-pugliese.

5.3 Definizione oggettiva dell'evento pluviometrico innescante: un problema aperto

La ricostruzione dell'evento pluviometrico innescante prevede l'individuazione del momento d'inizio e di fine della precipitazione (Figura 5.3-1). La durata D dell'evento pluviometrico responsabile dell'innescò della frana è calcolata misurando il tempo tra l'ora (se nota) o il giorno di innescò del fenomeno franoso (momento di fine) e il momento in cui l'evento pluviometrico ha avuto inizio (momento di inizio).

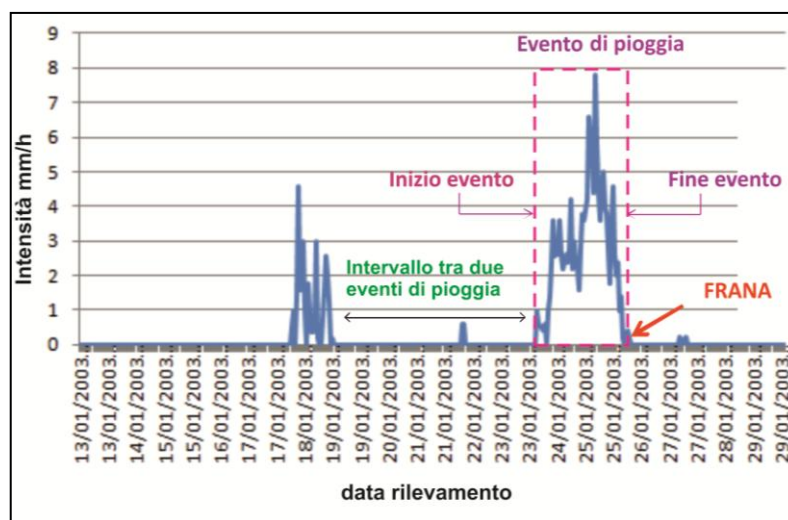


Figura 5.3-1 Esempio di ricostruzione dell'evento pluviometrico innescante.

La definizione dell'evento pluviometrico responsabile di fenomeni franosi superficiali non è un argomento di facile determinazione, ed è stato oggetto negli ultimi anni di approfondite ricerche nell'ambito della letteratura scientifica. Difatti l'identificazione delle condizioni pluviometriche che causano l'innescò di un fenomeno franoso è stata realizzata spesso con procedure caratterizzate da evidenti gradi di soggettività (Segoni et al., 2014b).

Tali scelte soggettive influenzano significativamente l'individuazione dell'evento pluviometrico innescante, soprattutto nel caso di eventi con andamento nel tempo caratterizzato da scrosci più intensi alternati a brevi periodi di precipitazioni assenti o di bassa intensità.

Altri problemi sono inoltre riscontrabili nell'individuazione del momento d'innescò dei fenomeni franosi. Difatti la ricostruzione dell'esatta ora di innescò della frana, in caso di informazioni lacunose, è realizzata molte volte in maniera soggettiva, nella maggior parte dei casi in corrispondenza del picco principale di intensità di precipitazione, o al termine delle registrazioni della giornata.

Al fine di superare tali problematiche, Aleotti (2004) definisce l'inizio dell'evento pluviometrico innescante coincidente con il momento in cui l'intensità di pioggia aumenta significativamente, dunque in corrispondenza con un brusco cambio di pendenza della precipitazione cumulata (vedi Figura 5.3-2). Pignone et al. (2005) calcolano un quantitativo di pioggia che va dal momento di innesco della frana fino ad un intervallo giornaliero (h 24) in cui la cumulata di pioggia è inferiore a 5 mm, mentre Berti et al. (2012) ricercano un intervallo di non pioggia di almeno 3 giorni consecutivi e con precipitazione cumulata inferiore ai 5 mm. Brunetti et al. (2010) adottano nella costruzione della soglia nazionale un intervallo minimo di 2 giorni nei mesi meno piovosi (da maggio a settembre) e 4 giorni nei mesi con maggiore piovosità (da ottobre a aprile), giustificando la propria scelta in quanto l'evapotraspirazione è doppia nel periodo estivo ed è inversamente proporzionale al tempo necessario affinché il suolo si asciughi (Melillo et al, 2014).

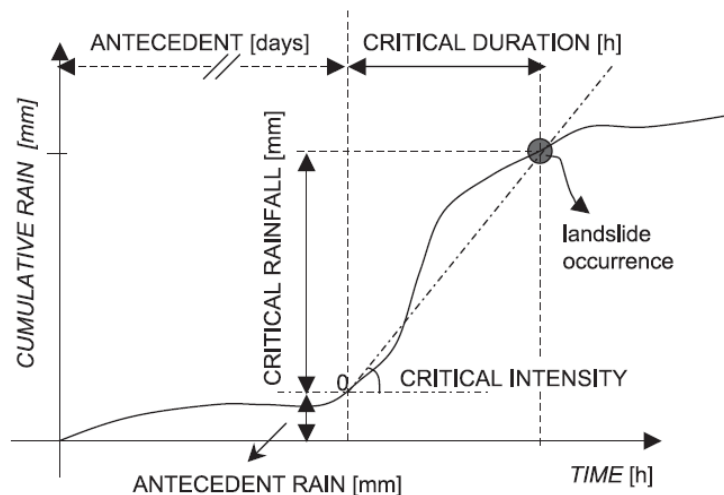


Figura 5.3-2 Identificazione dell'inizio dell'evento meteorico innescante proposto da Aleotti (2004).

Con l'obiettivo di risolvere la problematica sopracitata Vessia et al. (2014) hanno elaborato una procedura automatica in grado di simulare il comportamento dell'esperto la cui validazione è stata in parte oggetto del dottorato di ricerca.

Come riportato in precedenza, l'utilizzo del metodo automatico, da noi validato, permette anche a personale non esperto nella costruzione del database (ad esempio, operatori di protezione civile), un continuo aggiornamento del database stesso, il che permetterà un continuo miglioramento di prestazioni a livello statistico nella costruzione della soglia finale.

Inoltre, con la collaborazione del CNR IRPI è stato realizzato un codice automatico mediante il software open source R, in grado di replicare il processo automatico descritto in Vessia et al.

(2014), che è stato reso disponibile gratuitamente alla pagina web <https://github.com/gvessia/LANDTRAIN>.

Il processo di validazione, nonché il codice automatico sono stati preventivamente pubblicati in Vessia et al. (2016) e di seguito riassunti.

5.3.1 Validazione di una procedura automatica per la definizione dell'evento pluviometrico innescante

Come già spiegato nei paragrafi precedenti (vedi par. 5.2), al fine di validare il metodo proposto da Vessia et al. (2014), sono stati confrontati il metodo definito "automatico" e il metodo definito "esperto" (Brunetti et al., 2010, 2015; Peruccacci et al., 2012) sulla base di 300 eventi che abbiano scatenato almeno un fenomeno franoso, localizzati nei settori centrali e meridionali dell'intera penisola, e facenti parte di un più grande database collezionato sull'intero territorio italiano dal gruppo di ricerca del CNR-IRPI (Brunetti et al., 2015).

La descrizione dei due metodi è ben dettagliata in Vessia et al. (2014), mentre in Figura 5.3-3 viene riportato uno schema logico dei due metodi che evidenzia le caratteristiche principali per l'individuazione delle caratteristiche di pioggia innescanti fenomeni franosi.

Le due procedure mostrano caratteristiche comuni, come ad esempio: 1) l'assunzione che la fine del tempo di pioggia da cumulare sia coincidente con l'innescamento della frana; 2) la ricerca del tempo iniziale della pioggia; 3) l'uso di pluviometri rappresentativi selezionati all'interno di un raggio di 10 km dal punto di accadimento della frana; 4) la divisione della precisione spaziale in 4 classi ($<1\text{km}^2$ (p1), $1 < 10\text{km}^2$ (p2), $10 < 100\text{km}^2$ (p3), $100 < 1000\text{km}^2$ (p4)); 5) la divisione della precisione temporale in 3 classi: oraria ($\pm 1\text{h}$); intervallo giornaliero ($\pm 6\text{h}$); giornaliero ($\pm 24\text{h}$) (Gariano et al., 2012).

Le differenze principali tra il metodo "esperto" e il metodo definito "automatico" sono caratterizzate principalmente dal modo di scelta dell'inizio di pioggia innescante. Infatti il metodo esperto seleziona l'inizio della pioggia visivamente, andando ad analizzare i dati pluviometrici per un intervallo di 20 giorni precedenti l'innescamento della frana. Si assume che l'inizio dell'evento innescante debba essere segnalato dopo un periodo di non pioggia $\Delta T=48\text{h}$, durante i mesi primaverili ed estivi; $\Delta T=96\text{h}$ nei mesi autunnali e invernali (Peruccacci et al., 2012), avvalendosi del principio che l'evapotraspirazione in Italia è doppia nei mesi estivi rispetto a quelli invernali (Melillo et al., 2014).

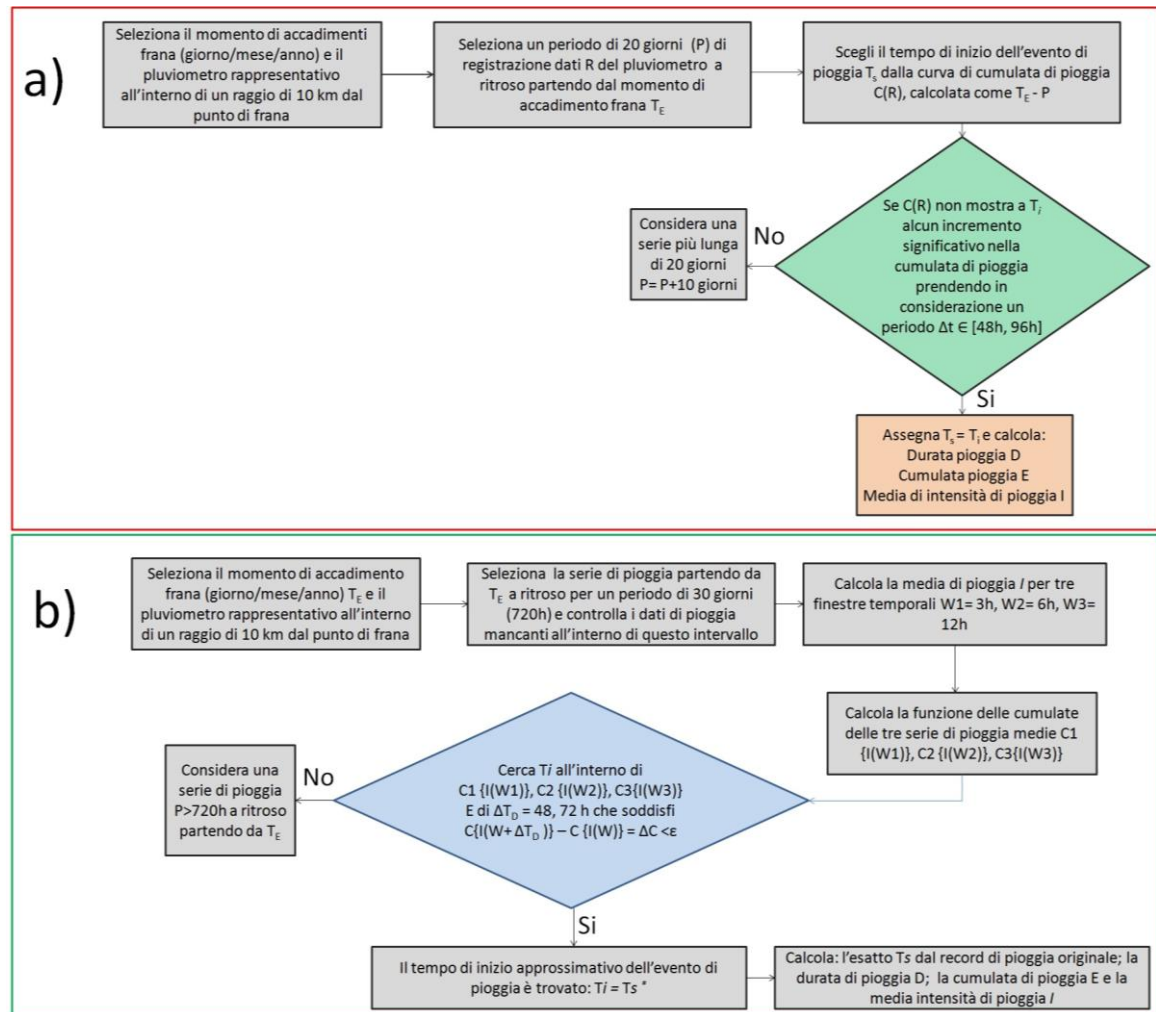


Figura 5.3-3 Sequenza logica per la scelta per la scelta dei valori di cumulata (C) e durata (D) che hanno innescate fenomeni franosi: a) metodo esperto (riquadro rosso); b) metodo automatico (riquadro verde)(modificato da Vessia et al., 2016).

Il metodo definito "automatico" creato da Vessia et al. (2014), analizza il record di pioggia dei 30 giorni precedenti l'innescò della frana, guardando due differenti finestre di intervallo ($\Delta T = 48h$ e $72h$), lungo le quali le cumulate di pioggia di tre differenti serie di intensità (3h, 6h, 12h) hanno una stasi nell'incremento. In questo modo non esiste alcuna necessità di creare differenze stagionali e nel metodo risulta essere completamente ignorato il problema dell'evapotraspirazione.

Nel metodo automatico il tempo iniziale di pioggia (T_s) è calcolato a partire dalla prima ora di pioggia dopo due periodi di $\Delta T = 48h$ e $72h$, caratterizzata da bassi valori di intensità di pioggia ($\varepsilon < 0,2$ mm/h). Questi due periodi sono considerati come il minimo tempo che discrimina la fine di un evento di pioggia e l'inizio di uno nuovo, indipendente dal precedente. La scelta di combinare due diversi periodi permette, attraverso il metodo automatico, di stabilire 4 differenti pattern di pioggia: 1) brevi periodi di pioggia con brevi periodi di non pioggia, 2) brevi periodi di

pioggia con lunghi periodi di non pioggia, 3) lunghi periodi di pioggia con brevi periodi di non pioggia, 4) lunghi periodi di pioggia con lunghi periodi di non pioggia.

Un'altra sostanziale differenza tra il metodo esperto e quello automatico è legato al fatto che mentre il metodo esperto dà come risultato solo una coppia di durata (D) e cumulata (E) per ogni frana, il metodo automatico fornisce ben sei possibili coppie innescanti di D e E. Ciò è dovuto alla combinazione dei due parametri: 3 finestre W (intensità media) e 2 finestre di periodi di intervallo ΔT (48h e 72 h). Le sei combinazioni ottenute simulano così il giudizio esperto nel calcolo dell'evento di pioggia innescante, andando però a cambiare in accordo alla stagionalità, alle zone climatiche, e all'altitudine.

L'utilità della validazione di questo metodo automatico risiede nella volontà di poter dare la possibilità ad utenti non esperti, ma che in ogni caso contribuiscono all'acquisizione dei dati, quali ad esempio operatori della protezione civile, di recuperare multipli valori di coppie durata (D) - cumulata (E) o durata - intensità (I) da un input di fenomeni franosi di cui si conosce solo l'orario di innesco del fenomeno. Le procedure automatiche permettono dunque di aumentare il database di valore di D-E o D-I associati a determinati fenomeni franosi specialmente nelle aree povere ancora di dati, come ad esempio nel nostro caso di studio.

5.3.1.1 Database utilizzato per la validazione del metodo automatico

Le principali proprietà del database utilizzato sono mostrate in Figura 5.3-4 (a-e). La Figura 5.3-4b mostra la precisione temporale nell'acquisizione del dato di occorrenza della frana. Dal grafico si evince come la maggior parte delle frane (54%) abbiano una precisione oraria di segnalazione; il 31% possiede una precisione oraria presunta ovvero intervallo orario di un determinato giorno, inteso come mattina, pomeriggio, sera, notte; mentre solo il 15% possiede una precisione giornaliera del dato, che in questo caso viene indicato con le 23h e 59m del giorno della segnalazione.

Per quel che riguarda i tipi di movimento, riportati in Figura 5.3-4d, è da notare come una significativa parte delle frane non possiede un'esatta descrizione del meccanismo. In aggiunta, nelle Figure 5.3-4c e Figura 5.3-4d sono mostrati i tipi di clima (secondo la classificazione di Koppen) e le classi fisiografiche in cui i dati presi in considerazione ricadono. In sintesi i fenomeni franosi selezionati ricadono in 4 tipi di clima temperato, tipici dell'area mediterranea e consistono in: Sub-tropicale temperato (Cs); temperato sub-continentale (Cf6); temperato sub-costale (Cs7) e temperato caldo (Cs8). Inoltre, dalla modifica della mappa fisiografica "Carta Natura" (ISPRA, 2013), sono state selezionate differenti classi fisiografiche, in cui i fenomeni

franosì utilizzati vengono così ripartiti: 61% ricadenti nelle aree collinari, 23% nelle aree montane e 14% nelle aree di pianura e costiera.

Questa breve descrizione geografica dei 300 dati selezionati, permette di capire quanto il campione considerato sia rappresentativo dei fenomeni franosi che caratterizzano i settori centrali e meridionali del territorio italiano.

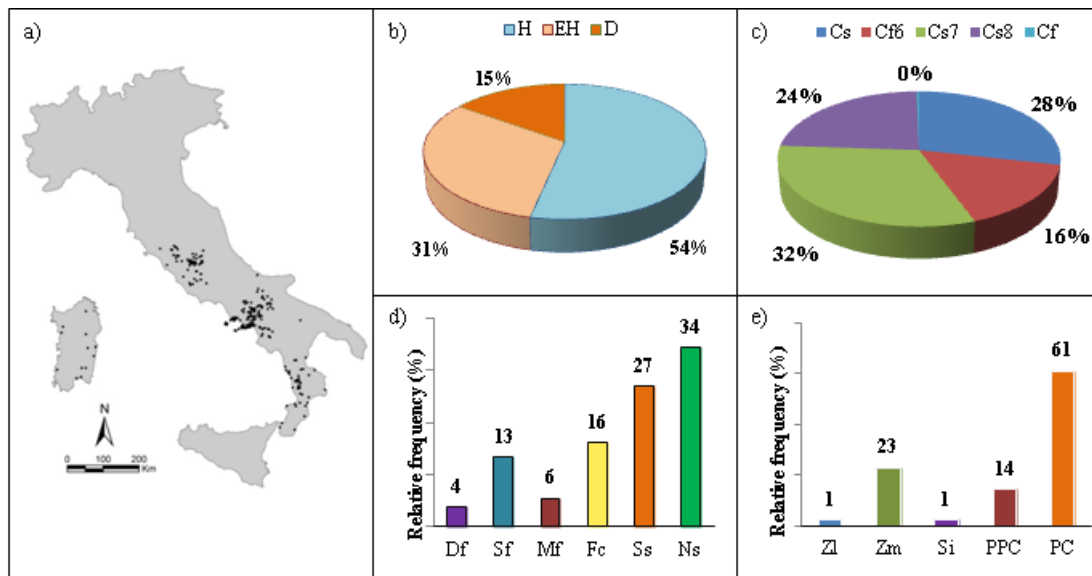


Figura 5.3-4 a) Localizzazione del database selezionato sul territorio italiano. b) Accuratezza temporale (H=oraria; EH= oraria stimata; D=giornaliera). c) Classificazione climatica (CS=Sub-tropicale temperato; Cf6= temperato sub-continentale; Cs7= temperato sub-litorale; Cs8= temperato caldo). d) Tipo di movimento (Df= Debris debris flow; Sf=soil flow; Mf=mud flow; Fc=fall; Ss=soil slip; Ns=non specificato). e) Unità fisiografiche (Zl= zona lacustre; Zm= zona montana; Si= zona intra-montana; PPC=pianura e coste; PC= collina) (Vessia et al., 2016).

5.3.1.2 Confronto statistico tra il metodo automatico e il metodo esperto

Successivamente all'acquisizione dei dati pluviometrici, attraverso il codice di calcolo LANDTRAIN, sono state derivate 6 differenti coppie composte da 300 dati di D e E. Le sei coppie ottenute sono state plottate sui diagrammi in Figura 5.3-5, e da esse sono state calcolate le soglie medie riportate in figura. Le soglie create attraverso le differenti combinazioni sono state dunque confrontate singolarmente con la sola soglia italiana creata attraverso il metodo esperto. Dall'analisi del confronto è possibile notare come queste siano caratterizzate da un trend molto simile (Figura 5.3-5), sebbene il coefficiente R^2 del metodo esperto sia sempre più alto rispetto a quelli relativi al metodo automatico.

Dai diagrammi di Figura 5.3-5, è inoltre facilmente distinguibile come i 6 database creati con il metodo automatico mostrino tra di loro caratteristiche differenti in accordo con le combinazioni dei parametri delle finestre di W (intensità media) e delle 2 finestre dei differenti intervalli di periodo scelti ΔT (48h e 72 h). E' infatti riscontrabile come nelle analisi con il $\Delta T=48h$ (Figura 5.3-5a-c), i valori di durata ricadono all'interno del campo dei valori estremi

definiti dal metodo esperto, mentre al contrario quando la scelta ricade in $\Delta T = 72h$, il metodo automatico mostra valori di durata più alti rispetto a quello derivato dall'esperto (Figura 5.3-5d-f).

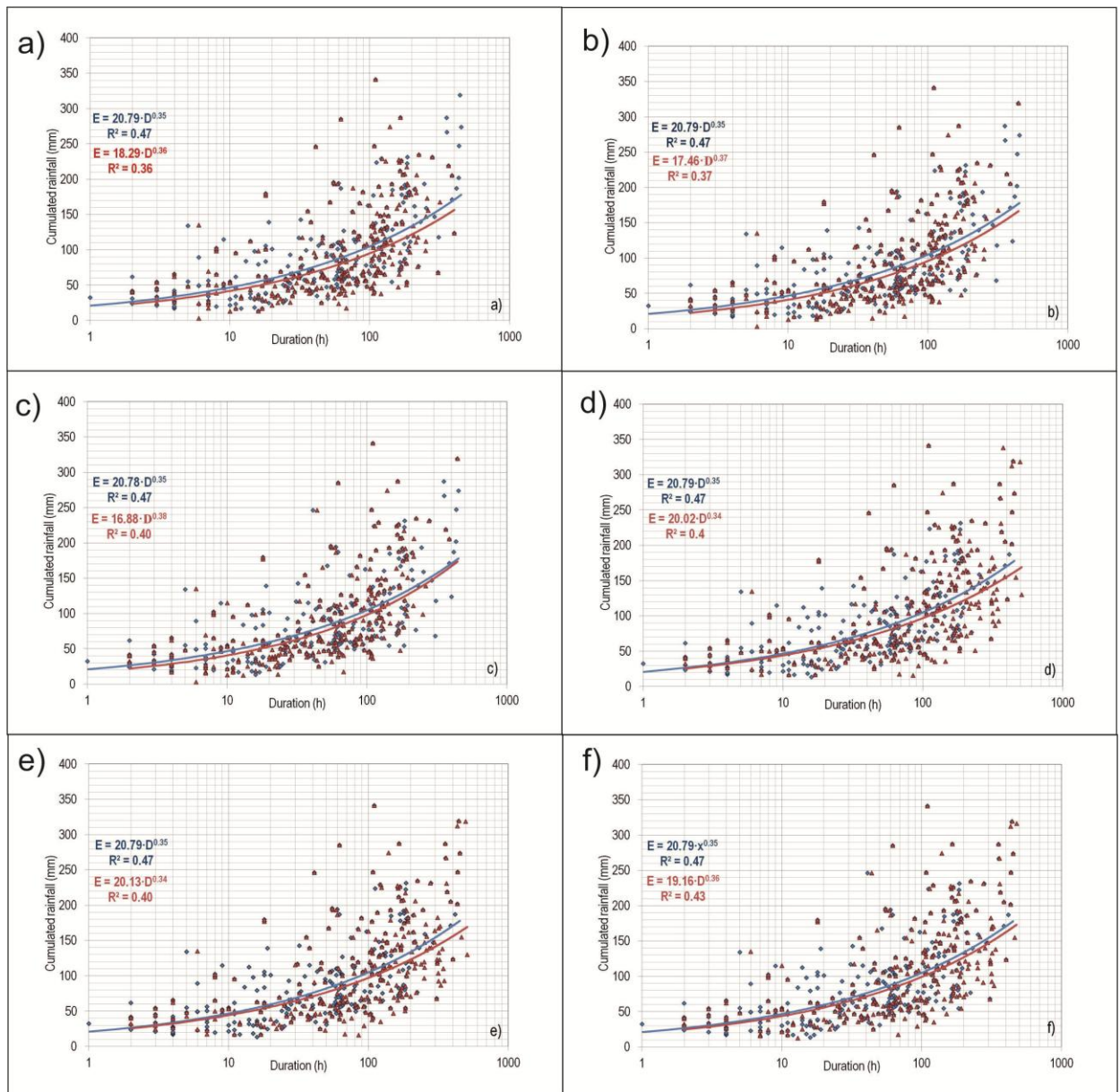


Figura 5.3-5 Soglie medie tracciate mediante il metodo dei minimi quadrati con scala log in ascissa: le coppie riportate in blue sono quelle calcolate con il metodo esperto, le coppie in rosso sono quelle calcolate con il metodo automatico. Le varie figure da a) a f) rappresentano il confronto del metodo esperto con le varie combinazioni in output date dal metodo automatico (Vessia et al., 2016).

In Tabella 5.3-1 sono invece riportati i valori medi, della mediana, della deviazione standard, e i minimi e i massimi valori dei vari campioni di cumulata e durata. In dettaglio, analizzando le coppie D e E, calcolate con $\Delta T = 48h$, per quel che riguarda i soli valori di cumulata i valori di media, mediana e deviazione standard sono più bassi rispetto ai valori calcolati con il metodo esperto. Invece, per i valori di durata, la media e la mediana mostrano valori più alti, mentre la deviazione standard è più bassa.

Analizzando i soli valori realizzati settando $\Delta T=72h$ per le 3 differenti finestre temporali (3h,6h, 12h), in tutte le serie di cumulata e durata i valori sono sempre più alti rispetto a quelli stimati dal metodo esperto.

Tabella 5.3-1 Alcuni rilevanti parametri dei campioni di cumulata e durata costruiti con il metodo automatico e il metodo esperto (modificato da Vessia et al. 2016)

	Metodo esperto	Aut 48x3	Aut 48x6	Aut 48x12	Aut 72x3	Aut 72x6	Aut 72x12
Cumulata							
Media	96,5	94,8	92,7	91,2	108,3	107,0	105,2
Mediana	78,0	74,6	70,1	69,1	93,3	93,3	91,1
Deviazione standard	63,4	59,9	61,0	61,0	67,8	66,4	66,7
Minimo	13,4	2,9	2,9	2,9	15,8	15,8	12,6
Massimo	341,2	341,2	341,2	341,2	341,2	341,2	341,2
Durata							
Media	83,8	88,3	81,3	76,1	128,5	123,9	113,9
Mediana	58,0	70,0	63,0	60,0	103,5	100,5	84,0
Deviazione standard	90,5	72,1	69,7	67,9	110,0	107,6	103,3
Minimo	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Massimo	451,0	403,0	444,0	444,0	509,0	509,0	478,0

In Tabella 5.3-2 sono riportati i risultati ottenuti dalla sovrapposizione tra i valori creati con il metodo esperto e i valori creati con il metodo automatico, prendendo in considerazione due intervalli di tolleranza: $\pm 10mm$ e $\pm 10h$ per la cumulata e la durata. Dalle analisi si evince come vi siano alti valori di sovrapposizione sia per i gruppi calcolati con $\Delta T=48h$ che con $\Delta T=72h$. Nel dettaglio, i gruppi dei $\Delta T=48h$ mostrano una percentuale di sovrapposizione tra il 77% e il 79% per le cumulate, e tra il 64 e il 69% per le durate. I gruppi riferiti al $\Delta T=72h$ sono caratterizzati da più bassi valori di sovrapposizione, il che è essenzialmente dovuto al criterio di selezione dei valori di cumulata e durata. Difatti il metodo automatico seleziona l'evento di pioggia innescante attraverso le analisi delle cumulate e di conseguenza si calcola poi la durata, che dunque risulta essere una stima indiretta, essenzialmente derivata dalla cumulata.

Infine, considerando tutte le 6 coppie di durata e cumulata, la percentuale di sovrapposizione di valori sale rispettivamente all'82% per la durata e al 90% per la cumulata. Più bassi valori di durata sono inoltre dovuti al fatto che il *range* di cumulata di $\pm 10mm$ può essere molto più differente rispetto alle $\pm 10h$ del *range* di durata, dipendendo dal tipo di pattern di pioggia e dalla scelta della valutazione dell'esperto. Dall'analisi delle percentuali di sovrapposizione si può dunque desumere che da un punto di vista deterministico possono essere considerati

soddisfacenti e quindi il metodo automatico sembra mimare in gran parte quanto creato dal giudizio dell'esperto.

Tabella 5.3-2 Percentuale di sovrapposizione dei valori di cumulata e durata tra i due metodi: esperto (Exp), automatico (Aut) (modificato da Vessia et al., 2016)

	Valori di cumulata $\pm 10\text{mm}$ (%)	Valori di durata $\pm 10\text{h}$ (%)
Esperto-Automatico 48x3	79	64
Esperto-Automatico 48x6	78	66
Esperto-Automatico 48x12	77	69
Esperto-Automatico 72x3	71	58
Esperto-Automatico 72x6	73	61
Esperto-Automatico 72x12	77	66
Esperto Automatico (totale)	90	82

Successivamente, al fine di rendere più robusto il processo di validazione è stato considerato un processo di validazione del metodo automatico statistico. Sono stati utilizzati diversi test statistici parametrici e non parametrici sui campioni di 300 valori di cumulata di pioggia, e di durata. Le ipotesi nulle dei test considerati, sono state applicate a campioni diversi di E e D ottenuti da diverse porzioni di registrazioni pluviometriche. Infatti, come già detto in precedenza i due metodi, automatico e esperto usano due differenti criteri per il calcolo dei valori di E e D.

Inoltre, i 300 valori ottenuti attraverso il metodo esperto sono stati selezionati dal giudizio di diversi esperti, il che implica che l'applicazione è influenzata dalla soggettività dei differenti soggetti. Il metodo esperto consiste nella osservazione delle misure orarie dei pluviogrammi che vengono sommate a ritroso fino alla interruzione di pioggia considerata significativa per l'inizio di un nuovo evento pluviometrico. Da questo punto nel pluviogramma si determina la data dell'inizio dell'evento di pioggia. Il metodo automatico, invece, osserva i valori delle variazioni di intensità durante le misure di pioggia nelle differenti finestre di tempo utilizzate. Queste due procedure generano dunque differenti valori di cumulata (E) sebbene siano riferiti agli stessi pluviometri e relativi allo stesso fenomeno franoso. Quindi, attraverso il processo di validazione e di comparazione tra i due metodi definiti come "automatico" e "esperto", si è cercato di capire se i due metodi generassero coppie di D e E statisticamente equivalente e se dunque potessero essere usate entrambe per una successiva ricostruzione della soglia pluviometrica. Considerata la circostanza che il metodo esperto genera un solo campione di E e D mentre il metodo automatico ne genera 6, i test statistici cercheranno almeno un campione generato dal metodo automatico che sia statisticamente equivalente a quello esperto, sia per i *dataset* di E che per quelli di D.

Il confronto statistico tra le coppie di E e D calcolate con entrambi i metodi, è stato condotto mediante test statistici sulle distribuzioni marginali delle suddette coppie e sui loro valori medi e di varianza. Questi test sono stati effettuati attraverso il programma di calcolo *Statgraphics* (StatPoint Technologies, 2013) e sono stati effettuati su tutte le 6 coppie di D e E ottenute con il metodo automatico (calcolate con i tre valori di W e i due di ΔT).

Dapprima, sono stati condotti i test sulle coppie ordinate; quindi sono stati applicati alle differenze tra i valori delle coppie $E_{Aut}-E_{Esp}$ e $D_{Aut}-D_{Esp}$. I tre test hanno verificato le ipotesi di uguaglianza della media, della mediana e della deviazione standard. I test di *student* e di *rank* sono stati usati per la verifica delle prime due ipotesi, mentre il χ^2 è stato usato per la terza, e in tutti i test il P-value utilizzato come soglia da superare per rigettare l'ipotesi nulla è stato assunto pari al 5%. I risultati di questi test sono riportati in Tabella 5.3-3, e l'ipotesi nulla è rigettata per la maggior parte delle coppie D e E. Da ciò si deduce che i campioni durata e cumulata, calcolati con entrambi i metodi, non possono essere considerati come appartenenti alla stessa popolazione, se gli stessi sono presi come misure accoppiate.

Tabella 5.3-3 Comparazione statistica delle coppie D e C. Le ipotesi nulle sono tutte controllate al 95% di confidenza. In colonna sono elencati i valori di P-value (modificato da Vessia et al., 2016)

Coppie di campioni	Nessuna differenza tra i valori medi (Student test)	Nessuna differenza tra le mediane (rank test)	Nessuna differenza tra le standard deviation χ^2
Cumulata (esperto 48x3)	0,35	0,0	0,0
Cumulata (esperto 48x6)	0,06	0,03	0,0
Cumulata (esperto 48x12)	0,02	0,12	0,0
Cumulata (esperto 72x3)	0,0	0,0	0,0
Cumulata (esperto 72x6)	0,0	0,0	0,0
Cumulata (esperto 72x12)	0,0	0,0	0,0
Durata (esperto 48x3)	0,32	0,0	0,0
Durata (esperto 48x6)	0,58	0,0	0,0
Durata (esperto 48x12)	0,09	0,07	0,0
Durata (esperto 72x3)	0,0	0,0	0,0
Durata (esperto 72x6)	0,0	0,0	0,0
Durata (esperto 72x12)	0,0	0,0	0,0

Nella una seconda fase dello studio statistico le 300 coppie di D e E ottenute con il metodo esperto sono state analizzate indipendente dalle 6 combinazioni di coppie D ed E. In Tabella 5.3-4 sono elencate il miglior *fitting* del modello di distribuzione delle durate e delle cumulate, stimate attraverso il test di Kolmogorov-Smirnov. P-value mostra invece l'accuratezza della stima del modello di distribuzione tra le coppie. Questo test verifica le ipotesi nulle al 95% del

livello di confidenza, questo vuol dire che P-value dovrebbe essere più alto di 0.05 quando la nulla ipotesi è accettata.

Tabella 5.3-4 Miglior fitting di distribuzione per le coppie di D e E (modificato da Vessia et al., 2016).

Campione	Kolmogorov-Smirnov's test	P value
Cumulata esperto	LogNormal	0,74
Cumulata 48x3	LogNormal	0,56
Cumulata 48x6	LogNormal	0,68
Cumulata 48x12	LogNormal	0,67
Cumulata 72x3	LogNormal	0,16
Cumulata 72x6	LogNormal	0,13
Cumulata 72x12	LogNormal	0,24
Durata esperto	Weibull	0,46
Durata 48x3	Weibull	0,14
Durata 48x6	Weibull	0,31
Durata 48x12	Weibull	0,23
Durata 72x3	Weibull	0,59
Durata 72x6	Weibull	0,78
Durata 72x12	Weibull	0,78

Dalla Tabella 5.3-4 si possono evincere due sostanziali informazioni: 1) tutti i campioni di cumulate seguono una distribuzione log-normale con alti valori di P-value; 2) tutti i campioni di D mostrano alti valori di P-value per il modello di distribuzione di Weibull.

Nelle Figura 5.3-6 e Figura 5.3-7, sono inoltre mostrati le PDF (*probability density function*) dei migliori modelli di adattamento per le coppie D e E. Dalle PDF è evidente che le coppie realizzate dagli esperti vengono simulate meglio dal gruppo di 3 campioni determinati dal metodo automatico nel caso dell'uso della finestra delle $\Delta T=48h$.

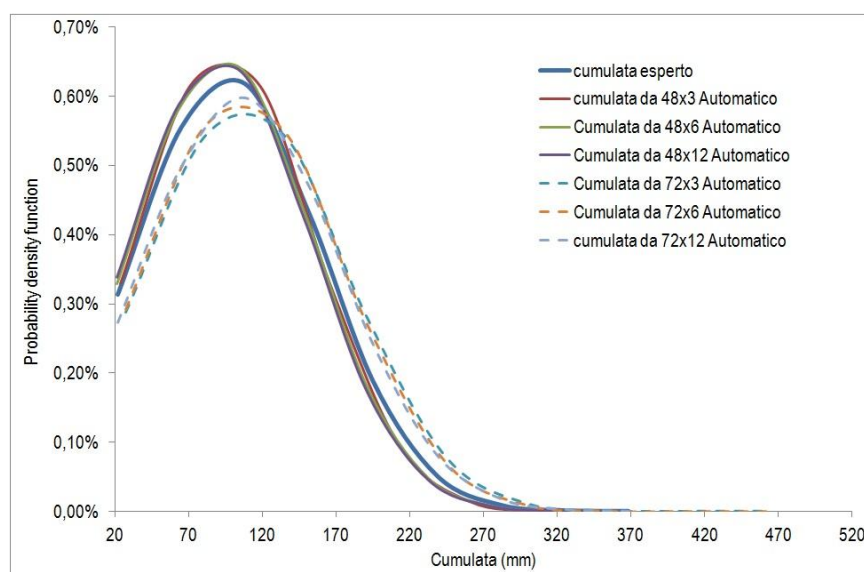


Figura 5.3-6 Miglior fitting dei modelli di distribuzione per i sei campioni dei valori di cumulata calcolati attraverso il metodo automatico e il campione derivato dal metodo esperto (modificato da Vessia et al., 2016).

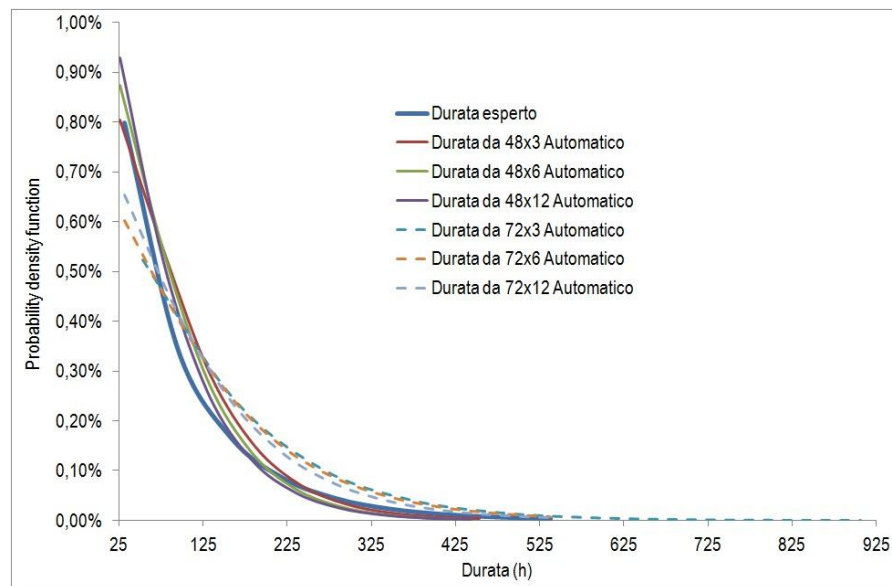


Figura 5.3-7 Miglior fitting dei modelli di distribuzione per i sei campioni dei valori di durata calcolati attraverso il metodo automatico e il campione derivato dal metodo esperto (modificato da Vessia et al., 2016).

In Tabella 5.3-5 vengono inoltre sintetizzati i risultati del confronto statistico delle coppie di D e E dei metodi automatico ed esperto mediante ulteriori test. Questi hanno lo scopo di controllare essenzialmente tre ipotesi nulle sull'uguaglianza dei valori (attraverso il test di Fisher), sull'uguaglianza della varianza (tabella ANOVA e F test), e sull'appartenenza dei due campioni alla stessa popolazione (Kolmogorov–Smirnov's test).

Le ipotesi nulle sono verificate se nessuna significativa differenza tra le coppie generate mediante le due procedure sarà trovata con il 95% del livello di confidenza. Le comparazioni tra le coppie di cumulate verificano le tre ipotesi nulle, ma questo non è invece verificato per i campioni di durata. Infatti, i campioni di durata (D) seguono la distribuzione di tipo Weibull, che non è univocamente determinata attraverso i due momenti di 1° e 2° ordine ovvero media e varianza.

Quindi, i primi due test statistici possono essere correttamente applicati solo alle distribuzioni normali o log-normali. Tuttavia, la terza ipotesi nulla può essere applicata ai campioni di D ed E poiché il test di Kolmogorov-Smirnov è un test non parametrico. I campioni di durata dell'esperto accoppiati con la combinazione 48x12 della procedura automatica (Tabella 5.3-5) verificano quest'ultima nulla ipotesi. Quindi, si può dire che questi due campioni, in base al test non parametrico, appartengono alla stessa popolazione.

Tabella 5.3-5 Comparazione statistica tra le coppie dei campioni E e D: campioni ottenuti dal metodo esperto sono confrontati con le coppie costruite con il metodo automatico. Le tre nulle ipotesi sono tutte controllate al 95% del livello di confidenza (modificato da Vessia et al., 2016).

Coppie di campioni indipendenti	Nessuna differenza tra i valori medi (Test di fisher)	Nessuna differenza tra le deviazioni standard (F test attraverso la tabella di ANOVA)	Nessuna differenza nelle funzioni delle distribuzioni cumulative (Kolmogorov–Smirnov test)
Cumulata (esperto vs 48 x 3)	0,74	0,33	0,99
Cumulata (esperto vs 48 x 6)	0,46	0,51	0,93
Cumulata (esperto vs 48 x 12)	0,3	0,51	0,65
Cumulata (esperto vs 72 x 3)	0,05	0,25	0,06
Cumulata (esperto vs 72 x 6)	0,05	0,42	0,08
Cumulata (esperto vs 72 x 12)	0,1	0,39	0,21
Durata (esperto vs 48 x 3)	0,5	non applicabile	0,02
Durata (esperto vs 48 x 6)	0,7	non applicabile	0,04
Durata (esperto vs 48 x 12)	0,24	non applicabile	0,3
Durata (esperto vs 72 x 3)	0	non applicabile	0
Durata (esperto vs 72 x 6)	0	non applicabile	0
Durata (esperto vs 72 x 12)	0,0002	non applicabile	0,0003

In conclusione, i test effettuati nella seconda fase di analisi dimostrano su base statistica che l'ipotesi nulla è verificata dai campioni di D dell'esperto e dalla combinazione automatica 48x12 (W x ΔT) ottenuta dalla procedura automatica. Si può quindi affermare che sulla base dei test statistici condotti sui campioni di coppie (E,D) calcolate dal metodo automatico nel caso della combinazione 48x12 appartengono alla stessa popolazione delle coppie (E,D) calcolate con il metodo esperto (Vessia et al., 2016). Ciò implica che i due metodi possono essere impiegati indifferentemente per tracciare una soglia pluviometrica empirica.

5.3.2 Risultati e discussioni del processo di validazione

In accordo con le analisi statistiche, solo una coppia di D e E derivate dal metodo automatico è rappresentativa del campione costruito con il metodo esperto. Nel dettaglio, per il database analizzato, distribuito su gran parte del territorio italiano, solo la combinazione 48X12 (W x ΔT) sembra replicare il campione creato attraverso il metodo esperto. Inoltre, al fine di selezionare in anticipo il campione di coppie tra i 6 creati attraverso il metodo automatico, è stata ispezionata la funzione di distribuzione cumulata (CdF) del solo campione di durata D. Ricordiamo, infatti, che entrambi i metodi automatico e esperto, prevedono la selezione dei valori di cumulata (E) dal quale derivano la scelta dei valori di durata (D). Detto ciò, in Figura 5.3-8 sono mostrate le sei CdF dei campioni di durata D dove le combinazioni 48x3, 48x6 e 48x12 hanno la cumulata più verticale. La curva appartenente alla CdF della finestra 48x12 mostra la maggiore verticalità, il

che può essere analiticamente apprezzato attraverso un coefficiente di verticalità C_v derivato dall'equazione:

Equazione 5.3-1

$$C_v = \frac{Q_{100}}{Q_{50}}$$

dove Q indica valori qualitativi: Q_{100} è il quarto quartile mentre Q_{50} è il secondo quartile. Questo indice rappresenta una misura addizionale della dispersione del campione di durata (D). Il miglior campione di D mostrerà il più alto coefficiente di verticalità, il che significa una minore dispersione del campione.

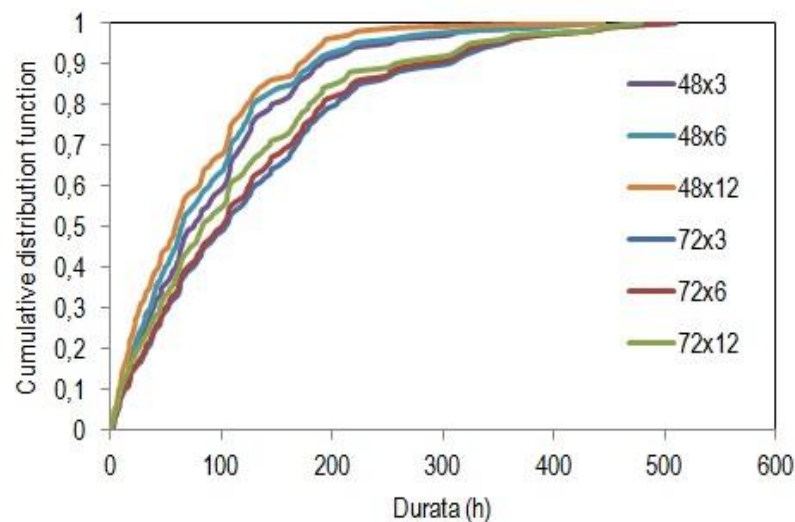


Figura 5.3-8 CDF dei campioni di durata dei 300 valori calcolati attraverso le 6 combinazioni del metodo automatico (modificato da Vessia et al., 2016)

Infatti i valori calcolati per i 6 campioni di D sono: $C_{v48 \times 3} = 5,37$; $C_{v48 \times 6} = 6,9$; $C_{v48 \times 12} = 7,46$; $C_{v72 \times 3} = 4,92$; $C_{v72 \times 6} = 5,06$; $C_{v72 \times 12} = 5,72$.

Nel nostro caso, il più alto valore C_v è relativo alla combinazione che statisticamente assomiglia maggiormente al campione di durata calcolato con il metodo esperto, corrispondente al 48 x 12.

In conclusione questo studio ha dimostrato, attraverso test statistici, che un metodo automatico può simulare il calcolo dell'evento di pioggia (in termini di D e E) responsabile dell'innesco di frane superficiali, compiuto da un utente esperto attraverso una procedura manuale. I risultati statistici più evidenti sono i seguenti:

- le coppie di D e E accoppiate attraverso i due metodi definiti come "automatico" e "esperto" non appartengono alla stessa popolazione;

- le coppie di D e E dei campioni analizzate in maniera indipendente, mostrano che almeno una combinazione dei parametri di W e ΔT implementati attraverso il codice fornito, è simile al campione creato con il metodo esperto;
- i campioni di durata sono molto più variabili dei corrispondenti campioni di cumulata; perciò, la combinazione di D e E dovrebbe essere scelta sulla base della varianza dei campioni di durata, attraverso il coefficiente di verticalità C_v appositamente introdotto.

Tutto ciò conferma che la procedura automatica simula quella esperta, nonostante la distorsione sistematica riportata nel paragrafo 5.3.1.2. Quindi la procedura prodotta attraverso il codice (allegato all'articolo Vessia et al., 2016) è utile per minimizzare l'errore umano e abilitare utenti non esperti per il calcolo dei valori di durata e cumulata soprattutto in casi in cui il database deve essere incrementato e/o aggiornato continuamente, ai fini delle attività di Protezione Civile come nel caso della zona Pugliese-Molisana.

6 Conclusioni e prospettive future della ricerca

È noto come il Molise sia una delle regioni d'Italia più affette da fenomeni franosi e da conseguenze associate che, sebbene non provochino generalmente vittime, infliggono tuttavia ingenti danni alle infrastrutture e conseguenti disagi alla popolazione. Da ciò emerge l'importanza di indagare sulla propensione al dissesto da frana a scala regionale al fine di individuare le aree a maggiore criticità, ed alcune tra le principali conseguenze associate quali l'esposizione degli elementi a rischio e le eventuali ricadute sullo stato di malessere demografico.

L'analisi di suscettibilità può considerarsi uno strumento efficace per la previsione di frane in termini di probabilità spaziale. Inoltre, in casi in cui le informazioni concernenti la probabile magnitudo associata ai fenomeni, e la probabilità temporale di accadimento siano di difficile reperimento, come nel caso della regione Molise, l'analisi della suscettibilità può rappresentare una base utile per interpretare statisticamente tutti gli elementi che predispongono al dissesto ed è quindi in grado di fornire informazioni utili per le attività di intervento in fase previsionale.

È importante ricordare che la distribuzione spaziale dei fenomeni franosi è fortemente influenzata sia da fattori umani che naturali. Nell'ambito di questo studio, tra i fattori potenziali di controllo dei fenomeni franosi, l'attenzione è stata focalizzata sul fattore della copertura del suolo e sul fattore precipitazioni.

La copertura del suolo controlla non solo la distribuzione spaziale delle frane, ma anche i loro effetti e gli impatti sugli elementi a rischio. Essa rappresenta un fattore altamente mutabile, le cui modificazioni possono avvenire in modo anche molto rapido (Slaymaker et al., 2009; Reichenbach et al., 2014).

Per quanto riguarda il fattore pioggia, è ben noto che le piogge intense e prolungate sono tra le principali cause d'innescò delle frane superficiali, le quali anche in Italia provocano ogni anno ingenti danni alle infrastrutture pubbliche e private e all'ambiente, nonché gravi perdite economiche (Salvati et al., 2010). Difatti un altro strumento, tra i più richiesti dalle amministrazioni pubbliche competenti, risulta essere il modello previsionale delle condizioni di innescò dei fenomeni franosi, indispensabile al fine di supportare decisioni in caso di emergenze. A questo proposito, la ricerca è stata anche incentrata sulla definizione di soglie pluviometriche per l'innescò di frane superficiali per la macro-regione Molisana-Pugliese, e sulla validazione di un processo automatico in grado di individuare i valori di cumulata, durata e intensità di pioggia, capaci di innescare frane.

Uno degli obiettivi principali dello studio condotto è stato quello di dimostrare che la copertura del suolo, oltre ad influire significativamente sulla suscettibilità da frana, non può essere ritenuta costante nel tempo. A tal fine, è stata effettuata una analisi multi-temporale (annate 1954, 1981 e 2007) circa il rapporto tra i cambiamenti locali di copertura del suolo e la distribuzione dei fenomeni franosi nel bacino del Torrente Rivo, localizzato nel settore collinare adriatico della regione Molise. Essendo ad oggi ancora poco esplorati i possibili scenari di cambiamento del suolo futuri e le relative conseguenze sulla propensione al dissesto, sono stati inoltre analizzati alcuni possibili scenari futuri di copertura del suolo e i relativi scenari di suscettibilità ai fenomeni franosi.

La prima parte del lavoro di tesi ha riguardato la valutazione della suscettibilità da frana a scala regionale. Sono state realizzate diverse mappe di suscettibilità tra le quali è stata selezionata quella che ha restituito la più affidabile rappresentazione della propensione al dissesto da frana nella regione Molise. I modelli realizzati hanno evidenziato che, tra i fattori predisponenti interrogati, le pendenze e le litologie affioranti hanno avuto maggiore effetto sulla propensione al dissesto. Le aree a maggiore propensione al dissesto sono infatti quelle caratterizzate da pendenze medie comprese tra i 10° e i 20° circa, in cui affiorano terreni argillosi. L'analisi ha infatti rilevato che le aree più suscettibili alla franosità della regione Molise risultano essere i settori centrali, prettamente caratterizzati dalla presenza delle Argille Varicolori, che presentano valori di resistenza al taglio estremamente più bassi rispetto a quelli delle altre unità affioranti.

Dall'interpolazione della mappa di suscettibilità selezionata con gli elementi a rischio quali vie di comunicazione principali (strade e ferrovie) e centri abitati, è stata valutata l'esposizione al rischio di tali elementi. È stato quindi dimostrato come il diverso grado di esposizione sembri poi aver avuto una ricaduta sullo stato di malessere demografico della popolazione (indice SMD; Bottazzi e Puggioni, 2013). L'analisi, infatti, ha evidenziato che la maggior parte dei comuni con alto SMD (tra discreta e gravissima) include in genere un'alta percentuale di elementi esposti a frana (in genere più del 30% di edificato e strade ricadenti nelle classi di esposizione più alte). È anche facilmente comprensibile come i frequenti disagi conseguenti all'insorgere di fenomeni franosi, quali interruzioni dei collegamenti stradali e danni a strutture abitative ed agricole, abbiano avuto un'incidenza maggiore in aree prettamente rurali dove possono aver incentivato le dinamiche di spopolamento e aver sfavorito la possibilità di investimenti economici in attività come turismo e agricoltura.

Le indagini condotte a scala di bacino per il Torrente Rivo, in termini di suscettibilità multi-temporale per gli anni 1954, 1981 e 2007, rivelano come una generale diminuzione delle più alte

classi di suscettibilità siano attribuibili principalmente alla conversione del pascolo verso aree a coltivo e delle aree denudate verso aree a cespuglieti, nonché al passaggio da cespuglieti verso aree a coltivo e aree boscate.

Il risultato ottenuto suggerisce che il bosco insieme alle aree sottoposte al coltivo abbiano un effetto di stabilizzazione dei pendii. Per quanto riguarda la possibile influenza del bosco sulla stabilità dei versanti, anche dalla letteratura emerge chiaramente come la presenza del bosco possa avere un effetto positivo (Schwarz et al., 2010; Caviezel et al., 2014); d'altra parte, per le aree a coltivo la deduzione non è così immediata. Esistono numerosi studi precedenti che sostengono l'effetto negativo della coltivazione sulla stabilità del pendio (Begueria, 2006; Wasowski et al., 2014). Tuttavia, nel presente caso studio la transizione da tipi di copertura del suolo che non prevedono alcuna azione antropica di manutenzione del suolo, o legate a fenomeni di abbandono, quali aree denudate o pascoli verso aree a coltivo, mostra un effetto positivo sulla distribuzione spaziale ed estensione della propensione al dissesto da frana. Per il bacino del Rivo, a valle delle osservazioni fatte, è possibile affermare che la presenza di aree a coltivo, che richiede una regimazione delle acque, si traduce in una migliore azione di manutenzione del territorio che determina una maggiore stabilità del pendio.

Circa l'influenza di futuri cambiamenti delle coperture del suolo sulla propensione al dissesto, in questo lavoro vengono presentati diversi possibili scenari (2030, 2050a e 2050b). I risultati dimostrano come in futuro corrette pratiche di gestione del territorio, quali ad esempio buone pratiche agricole ed aumento delle aree boscate soprattutto in zone degradate, possano determinare una diminuzione della suscettibilità da frana (scenari 2030 e 2050a). Al contrario, in uno scenario caratterizzato da condizioni climatiche peggiorative (2050b) che portano alla diminuzione di aree boscate e all'abbandono delle aree a coltivo, con possibile aumento degli effetti di incendi, porta ad un aumento della suscettibilità da frana.

In un contesto rurale come quello molisano si è ritenuto rilevante indagare, utilizzando il bacino del Rivo come area test, sui rapporti tra franosità, la propensione al dissesto e svalutazione monetaria dei terreni agricoli. Dall'analisi è stato riscontrato che le aree con maggiore perdita economica sono quelle definite come aree occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali e seminativi in aree non irrigue. Questa indicazione può rivelarsi molto utile nelle azioni di pianificazione territoriale.

Il ruolo delle precipitazioni come fattore d'innesco di fenomeni franosi superficiali è stato indagato per la macro regione Puglia-Molise, mediante la definizione di una soglia pluviometrica. Questo lavoro è stato condotto in collaborazione con il CNR IRPI di Bari (Guzzetti et al., 2007, 2008) che ha supportato la raccolta e l'elaborazione delle segnalazioni di

eventi di frana avvenuti in concomitanza di eventi pluviometrici nel territorio pugliese-molisano, e più specificatamente nelle province di Campobasso e Foggia. Il *database* costruito si attesta di un numero di eventi (57) non sufficiente a garantire una certa robustezza statistica, tuttavia i valori di densità di eventi riconosciuti per km² sono da ritenersi soddisfacenti. Anche se la soglia determinata è ancora affetta da un'elevata incertezza, dal confronto con le soglie ottenute con lo stesso metodo di analisi e pubblicate sia a scala nazionale (Brunetti et al., 2015) che in altre regioni (Abruzzo, Marche), si evince che nel contesto molisano-pugliese, l'accadimento di fenomeni franosi relazionati alla sola pioggia sembri avvenire mediamente per valori di pioggia leggermente minori rispetto al contesto nazionale. D'altra parte dal confronto con quella di altre regioni, è stato possibile notare che la soglia molisana-pugliese è molto simile a quella abruzzese, leggermente discrepante da quella marchigiana.

Lo scarso numero di eventi di frane pluvio-indotte riconosciuto ha evidenziato la necessità di validare e implementare un metodo automatico che consenta di riprodurre in maniera più oggettiva possibile i valori di cumulata e durata che hanno innescato un evento franoso, anche con lo scopo di minimizzare l'errore umano e abilitare utenti non esperti per il calcolo dei valori di durata e cumulata. Ciò è molto utile in casi in cui il *database* deve essere incrementato e/o aggiornato continuamente, ai fini delle attività di Protezione Civile. A questo proposito è stato validato e implementato sottoforma di codice di calcolo il metodo automatico di Vessia et al. (2014), in modo da poter simulare la decisione dell'esperto per la definizione delle condizioni pluviometriche che hanno determinato l'innescio franoso.

Lo studio statistico effettuato, riportato in Vessia et al. (2016), conferma che un metodo automatico può simulare il calcolo effettuato da un operatore umano dell'evento di pioggia (in termini di durata e cumulata), responsabile dell'innescio di frane.

Le ricerche ed i risultati qui presentati vanno incontro al crescente bisogno di mettere insieme dati relativi a rischi naturali ed i loro effetti socio-economici correlati, soprattutto in contesti regionali come quello molisano, dove gli eventi idrogeologici rappresentano una grave minaccia sia per lo sviluppo che per la sicurezza del territorio. In questa ottica, piuttosto che mantenere e promuovere l'approccio finora seguito che prevede interventi in fase di emergenza (cioè dopo l'accadimento di una frana), si potrebbe perseguire un approccio diretto alla prevenzione dei rischi idrogeologici, combinando i dati geologici e morfologici con un'analisi dei loro effetti sulle dinamiche sociali. Ciò vuol dire fare approcci mirati a comprendere le dinamiche del paesaggio antecedenti all'innescio degli eventi franosi, ed essere tempestivi nell'affrontare i loro possibili effetti (Guzzetti, 2015).

Difatti le informazioni prodotte nell'ambito di questa tesi rappresentano un bagaglio di conoscenze fondamentali nell'analisi concatenata di suscettibilità-pericolosità e rischio per la regione Molise, fornendo anche una panoramica dell'esposizione degli elementi a rischio all'insorgere dei fenomeni franosi.

Il lavoro fin qui condotto, tuttavia, pone l'attenzione su una serie di questioni che rimangono aperte. Una di queste riguarda la necessità di acquisire maggiori dati per l'aggiornamento della soglia pluviometrica al fine di diminuire l'incertezza associata. Per l'analisi a scala di bacino, sebbene l'approccio sviluppato e utilizzato sia generico e non consideri informazioni molto localizzate di copertura del suolo o vegetazione, esso si è dimostrato efficace e utile nella valutazione degli effetti delle modificazioni nelle coperture del suolo sulla stabilità dei pendii. Il metodo applicato per valutare la variazione della suscettibilità come conseguenza dei cambiamenti delle coperture del suolo potrebbe essere anche applicato su tutta la regione Molise, nonché ad altre aree con simili proprietà, previa acquisizione dei necessari dati territoriali.

Infine, i risultati ottenuti e insieme alle elevate criticità della regione Molise in termini di franosità, suggeriscono fortemente la necessità della messa in atto di un sistema di pianificazione territoriale più completo. Tale sistema dovrebbe mirare alla stima del rischio da frana che tenga in considerazione tra i fattori predisponenti anche quelli antropici, oltre che le conseguenze materiali (esposizione e danno economico) e sociali (es. stato di malessere demografico).

Bibliografia

- AA.VV. (2001) Studi delle dinamiche di versante in rapporto alla conservazione del suolo ed alle interazioni con i manti vegetali. Progetto Operativo Plurifondo 1994-1999 Regione Molise, sottoprogramma 6, misura 6.4. Relazione finale.
- Abramowitz M. & Stegun, I.A. (1972) (Eds.): *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, 10th edn., National Bureau of Standards, John Wiley and Sons, 1972.
- Agnoletti, M. (2007) The degradation of traditional landscape in a mountain area of Tuscany during the 19th and 20th centuries: Implications for biodiversity and sustainable management. *Forest Ecology and Management*, **249**(1–2), 5–17.
- Agterberg, F.P., Bonham-Carter, G.F., Cheng, Q., Wright, D.F. (1993) Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping. In: Davis JC, Herzfeld UC (eds) *Computers in geology 25 years of progress*, Vol.5 edn. Oxford University Press, New York, NY, USA, pp 13–23.
- Airò Farulla, C., Ferrari, A., Romero, E. (2010) Volume change behaviour of a compacted scaly clay during cyclic suction changes. *Canadian Geotechnical Journal*, **47**(6), 688–703
- Aleotti, P. & Chowdhury, R. (1999) Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **58**(1), 21–44.
- Aleotti, P. (2004) A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, **73**, 247–265.
- Almeida, C.M., (2003) Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil. Tese de doutorado do curso da Pós-graduação em sensoriamento remoto, INPE, São José dos Campos.
- Amato, V., Aucelli, P.P.C., Bracone, V., Cesarano, M., Di Paola G., Filocamo, F., Roskopf, C.M., Scorpio, V. (2014) L'evoluzione morfologica di lungo termine del settore molisano dell'Appennino meridionale. In: *Evoluzione geomorfologica di lungo termine del paesaggio nell'Italia meridionale* (Roskopf e Aucelli, 2014), AGR editrice.
- Antrop, M. (2004) Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landscape and Urban Planning*, **67**(1–4), 9–26.
- APAT, 2007. Rapporto sulle frane in Italia. Il progetto IFFI – Metodologia, risultati e rapporti regionali. Rapporto 78/2007. <http://sinanet.apat.it>.

- Ardizzone, F., Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (2002) Impact of mapping errors on the reliability of landslide hazard maps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **2**, 3–14.
- Ardizzone, F., Fiorucci, F., Santangelo, M., Cardinali, M., Mondini, A.C., Rossi, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F. (2013) Very-high resolution stereoscopic satellite images for landslidemapping. In: *Margottini, C., Canuti, P., Sassa, K. (Eds.), Landslide Science and Practice. Landslide Inventory and Susceptibility and Hazard Zoning*, 1. Springer, Heidelberg, Berlin, New York, pp. 95–101.
- Ascione, A., Ciarcia, S., Di Donato, V., Mazzoli, S., Vitale, S. (2011) The Pliocene-Quaternary wedge-top basins of southern Italy: an expression of propagating lateral slab tear beneath the Apennines. *Basin Research*, **23**, 1–19.
- Aucelli, P.P.C. (1999) Analisi morfodinamica del bacino del fiume Trigno: distribuzione, entità e cause dei fenomeni di alveo e di versante. Tesi di dottorato, Università degli studi del Molise.
- Aucelli, P.P.C., Cinque, A., Robustelli, G., Roskopf, C.M. (2000) Space and time distribution of landslides in a Mediterranean river basin: Trigno river valley (S. Italy). In: *Bromhead E., Dixon N. & Ibsen M.L. (eds), «Landslides, in research, theory and practice»*, **1**, 91 - 96, London.
- Aucelli, P.P.C. & Roskopf, C. (2000) Last century valley floor modifications of the Trigno river (Southern Italy): a preliminary report. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, **23**, 105-115.
- Aucelli, P.P.C., Cinque, A., Roskopf, C.M. (2001) Geomorphological map of the Trigno basin (Italy): explanatory notes. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, **24** (1), 3-12
- Aucelli, P.P.C., Ravera, F., Roskopf, C.M. (2002a) Analysis of the relationships between phenomena along the Adriatic flank of the Molise Apennines (Southern Italy) and territorial attributes by using a Geographical Information System. *Proceedings of the IAG Symposium on the relationships between man and mountain environment in terms of geomorphological hazards and human impact in Europe*. Dornbirn (Austria), 14 July 2002.
- Aucelli, P.P.C., Roskopf, C.M., Pappone G., Casciello E., Di Ludovico A. (2002b) Geomorphologic hazard generated by stratigraphic and tectonic juxtaposition in Molise region. *Proceedings of the IAG Symposium on the relationships between man and mountain environment oin terms of geomorphological hazards and human impact in Europe*. Dornbirn (Austria), 14 July 2002.

- Aucelli, P.P.C., Baranello, S., Roskopf, C.M., Russo, M., Scapillati, N. (2003) The rainfall event of 24-26 January 2003 in the Molise region: its effects on soil erosion and slope failure. *Proceedings of the Workshop on Geomorphological sensitivity and system response*, Camerino-Modena Apennines, July 2003.
- Aucelli, P.P.C., Balteanu, D., Izzo, M., Roskopf, C.M. (2004a) Types and mechanism of slope failure due to the rainfall event on January 2003 in Molise region (S. Italy). In: *Savindra Singh, H. S. Sharma & Sunil Kr De* (eds) *Geomorphology and Environment*, 125-142. ACB Publications, Kolkata, India.
- Aucelli, P.P.C., Brancaccio, L., Ravera, F., Roskopf, C.M. (2004b) Landslide susceptibility along the Adriatic flank of Southern Apennines (Italy): the case of Molise Region. In: *Savindra Singh, H. S. Sharma & Sunil Kr De* (eds) *Geomorphology and Environment*, 168-181. ACB Publications, Kolkata, India.
- Aucelli, P.P.C., Izzo, M., Mazzarella, A., Roskopf, C.M., Russo, M., (2004c) L'evento meteorico estremo di gennaio 2003 sul Molise. *Quaderni di Geologia Applicata*. **11**, 101–119.
- Aucelli, P.P.C., Caloiero, T., De Angelis, A., Gaudio, R., Roskopf, C.M. (2006) Analisi del rapporto afflussi-deflussi in piccoli bacini impostati su substrati impermeabili. In: *Erosione idrica in ambiente mediterraneo: valutazione diretta e indiretta in aree sperimentali e bacini idrografici*. Brigati – Genova 2006.
- Aucelli, P., Izzo, M., Mazzarella A., Roskopf, C.M. (2007). La classificazione climatica della regione Molise. *Bollettino della Società Geografica Italiana* (Roma)-Serie XXII, 12, 615-617.
- Aucelli, P.P.C., De Angelis, A., Marino, D., Marucci, A., Roskopf, C.M. (2008) Il danno economico e ambientale causato da frane nei territori rurali. Proposta metodologica per la valutazione e la realizzazione di strumenti di supporto alle decisioni. *Estimo e Territorio*, **71**, 5-23
- Aucelli, P.P.C., Robustelli G., Roskopf C.M., Scarciglia F., Di Paola G., Lucà F. (2010) Geomorphologic map of the area between Frosolone and Trivento (Molise, Italy). *Journal of Maps*, **6**, 423–434.
- Ayalew, L. & Yamagishi, H. (2005) The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, **65**, 15–31.
- Bai, S.B., Wang, J., Lü, G.N., Zhou, P.G., Hou, S.S., Xu, S.N. (2010a) GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China. *Geomorphology*, **115**(1-2), 23–31.

- Bai, S., Lü, G., Wang, J., Zhou, P., Ding, L. (2010b) GIS-based rare events logistic regression for landslide-susceptibility mapping of Lianyungang, China. *Environmental Earth Sciences*, **62**(1), 139–149.
- Beguería, S. (2006) Changes in land cover and shallow landslide activity: A case study in the Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, **74**(1-4), 196–206.
- Berti, M., Martina, M.L.V., Franceschini, S., Pignone, S., Simoni, A., Pizziolo, M. (2012) Probabilistic rainfall thresholds for landslide occurrence using a Bayesian approach. *Journal of Geophysical Research*, **117**, F04006, doi: 10.1029/2012JF002367.
- Blahut, J., van Westen, C.J., Sterlacchini, S. (2010) Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology*, **119**(1-2), 36–51.
- Bonham Carter, G.F., Agterberg, F.P., Wright, D.F. (1989) Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. *Short Courses Geol*, **10**, 15–23.
- Borgomeo, E., Hebditch, K.V., Whittaker, A.C., Lonergan, L. (2014) Characterising the spatial distribution, frequency and geomorphic controls on landslide occurrence, Molise, Italy. *Geomorphology*, **226**, 148–161.
- Bottazzi, G., Puggioni, G., Zedda, M. (2006) Dinamiche e tendenze dello spopolamento in Sardegna. Focus sulle aree LEADER. Regione Autonoma della Sardegna, Centro Regionale di Programmazione, Cagliari.
- Bottazzi, G. & Puggioni, G. (2013) Il malessere demografico. In: Comuni in estinzione - Gli scenari dello spopolamento in Sardegna. Progetto IDMS - 2013, Regione Autonoma Della Sardegna, pp 9–14.
- Bracchetti, L., Carotenuto, L., Catorci, A. (2012) Land-cover changes in a remote area of central Apennines (Italy) and management directions. *Landscape and Urban Planning*, **104**(2), 157–170.
- Bracone, V. (2012) Studio geologico-stratigrafico e geomorfologico nel settore costiero compreso tra il Fiume Trigno e il Fiume Fortore. Tesi di dottorato, Università degli studi del Molise, Italia.
- Brown, D.C. (1976) The Bundle Adjustment: Progress and Prospects, XIIIth international congress for photogrammetry, Helsinki, Finland. 116
- Brunetti, M., Colacino, M., Maugeri, M., Nanni, T. (2001) Trends in the daily intensity of precipitation in Italy from 1951 to 1996. *International Journal of Climatology*, **21**, 299–316.
- Brunetti, M., Maugeri, M., Nanni, T., Navarra, A., (2002) Droughts and extreme events in regional daily Italian precipitation series. *International Journal of Climatology*, **22**, 543–558

- Brunetti, M., Maugeri, M., Monti, F., Nanni, T. (2004) Changes in daily precipitation frequency and distribution in Italy over the last 120 years. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, **109** (D05), D05102. <http://dx.doi.org/10.1029/2003JD004296>
- Brunetti, M., Caloiero, T., Coscarelli, R., Gullà, G., Nanni, T., Simolo, C. (2012) Precipitation variability and change in the Calabria region (Italy) from a high resolution daily dataset. *International Journal of Climatology*, **32**, 57–73.
- Brunetti, M.T., Peruccacci, S., Rossi M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Mondini, A., Salvati, P., Tonelli, G., Valigi, D., Luciani, S. (2009) A prototype system to forecast rainfall induced landslides in Italy. *Proceedings of the 1st Italian Workshop on Landslides. Rainfall-Induced Landslides: mechanisms, monitoring techniques and nowcasting models for early warning systems*. Napoli, 8-10 Giugno 2009.
- Brunetti, M.T., Peruccacci, S., Rossi, M., Luciani, S., Valigi, D., Guzzetti, F. (2010) Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **10**, 447–458.
- Brunetti, M. T., Peruccacci, S., Antronico, L., Bartolini, D., Deganutti, A.M., Gariano, S.L., Iovine, G., Luciani, S., Luino, F., Melillo, M., Palladino, M.R., Parise, M., Rossi, M., Turconi, L., Vennari, C., Vessia, G., Viero, A., Guzzetti, F. (2015) Catalogue of rainfall events with shallow landslides and new rainfall thresholds in Italy. In: *G. Lollino et alii (eds) Engineering Geology for Society and Territory*, Vol. **2**, 1575-1579, Springer.
- Caine, N. (1980) The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler, Series A* **62**(1-2), 23-27.
- Calcaterra, D., Parise, M., Palma, B., Pelella, L. (2000) The influence of meteoric events in triggering shallow landslides in pyroclastic deposits of Campania, Italy. In: *Proceedings 8th International Symposium on Landslides, (Bromhead E, Dixon N, Ibsen ML, eds)*. Cardiff: A.A. Balkema, **1**, 209–214.
- Caloiero, T., Coscarelli, R., Ferrari, E., Mancini, M. (2011) Precipitation change in Southern Italy linked to global scale oscillation indexes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **11**, 1683–1694.
- Calvello, M., d’Orsi, R.N., Piciullo, L., Paes, N., Magalhaes, M.A., Lacerda, W.A. (2015) The Rio de Janeiro early warning system for rainfall-induced landslides: analysis of performance for the years 2010–2013. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **12**, 3–15.
- Campbell, J. B. (1996) Introduction to remote sensing. New York: The Guilford Press.
- Cannon, S.H. & Ellen, S.D. (1985) Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California. *California Geology*, **38**, 267–272.

- Cannon, S.H. (2001) Debris-flow generation from recently burned watersheds. *Environmental and Engineering Geoscience*, **7**, 321–341.
- Cannon, S.H. & Gartner, J.E. (2005) Wildfire-related debris flow from a hazard perspective. In: Jacob M., Hungr O. (eds) *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 363-385.
- Carone, M.T., Gioia, E., Ferretti, M., Marincioni, F. (2015) Linking vegetation patterns and landslide occurrence; an empirical method. In: Lollino, G., Giordan, D., Crosta, G., Corominas, J., Azzam, R., Wasowski, J., Sciarra, N. (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory Landslide Processes 2*. Springer International Publishing, Switzerland, pp. 1195–1198.
- Carranza, M. L., Ricotta, C., Fortini, P., Blasi, C. (2001) Quantifying landscape change with actual vs. potential natural vegetation. In U. Mander, A. Printsman, & H. Palang (Eds.), *IALE European Conference 2001: Development of European Land- scapes*, Tartu (Estonia), Nov. Institute of Geography, University of Tartu, (pp. 264–269).
- Carrara, A. (1983) Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, **15**, 403–426.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. (1992) Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. *ITC Journal*, **2**, 172–183.
- Casciello, E., Cesarano, M., Naso, G., Pappone, G., Roskopf, C.M. (2003) Il terremoto del 2002 in Molise e Puglia: i dati geologici e geomorfologici dell'area di S. Giuliano di Puglia. *Ingegneria sismica*. Anno XX, n. **3**: 32-37.
- Casciello, E., Cesarano, M., Naso, G., Pappone, G., Roskopf, C.M. (2004) The 2002 Molise and Puglia earthquake (italy): geological and geomorphological data of the San Giuliano di Puglia area. *Earthquake Spectra*, vol. **20**, No. S1:53-64
- Casciello, E., Cesarano, M., Pappone, G. (2006) Extensional detachment faulting on the Tyrrhenian margin of the Southern Apennines contractional belt (Italy). *Journal of the Geological Society of London*, **163**, 671-679.
- Cascini, L. (2008) Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales, *Eng. Geol.* **102**, 164-177.
- Castellanos Abella, E.A. & Van Westen, C.J. (2007) Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation. *Landslides*, **4**, 311–325
- Castellanos Abella, E. A. & Van Westen, C. J. (2008) Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantanamo, Cuba. *Geomorphology*, **94**, 453-466.

- Castellarin, A., Colacicchi, R., Praturlon, A. (1978) Fasi distensive, trascorrenze e sovrascorrimenti lungo la “linea Ancona-Anzio”, dal Lias medio al Pliocene. *Geologica Romana*, **17**, 161-189.
- Caviezel, C., Hunziker, M., Schaffner, M., Kuhn, N.J., (2014) Soil-vegetation interaction on slopes with bush encroachment in the central Alps - adapting slope stability measurements to shifting process domains. *Earth Surface Processes and Landforms*, **39**, 509–521.
- Ceballos-Silva, A. & López-Blanco, J. (2003) Evaluating biophysical variables to identify suitable areas for oat in Central Mexico: a multi-criteria and GIS approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **95**, 371–377.
- Ceriani, M., Lauzi, S., Padovan, N. (1992) Rainfall and landslides in the Alpine area of Lombardia Region, Central Alps, Italy. In: *Proceedings of the international symposium Interpraevent 1992*, Bern, Switzerland, 9–20.
- Ceriani, M., Lauzi, S., Padovan, N. (1994) Rainfalls and debris flows in the Alpine area of Lombardia region – central Alps – Italy. *Memorie Società Geologica Italiana*, **48**(3), 917-921.
- Cevasco, A., Pepe, G., Brandolini, P. (2014) The influences of geological and land-use settings on shallow landslides triggered by an intense rainfall event in a coastal terraced environment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **73**, 859–875.
- Chaplow, R. (1983) Engineering geomorphological investigations of a possible landslide, Killiecrankie Pass, Scotland. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **16**, 301-308.
- Choi, J., Oh, H. J., Lee, H.J., Lee, C., Lee, S. (2012) Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS. *Engineering Geology*, **124**, 12–23.
- Chung, C. & Fabbri A.G. (2003) Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. *Natural Hazards*, **30**, 451–472.
- Cihlar, J. & Jansen, L.J.M. (2001) From Land Cover to Land Use: A Metodology for Efficient Land Use Mapping over Large Areas. *Professional Geographer*, **53**(2), 275-289.
- Cinque, A., Patacca, E., Scandone, P., Tozzi, M. (1993) Quaternary kinematic evolution of the Southern Apennines. Relationship between surface geological features and lithospheric structures. *Annali di Geofisica*, **36**, 249-260.
- Ciscar, J. C., Iglesias, A., Feyen, L., Szabó, L., Van Regemorter, D., Amelung, B., Nicholls, R., Watkiss, P., Christensen, O.B., Dankers, R., Garrote, L., Goodess, C.M., Hunt, A., Moreno, A., Richards, J., Soria, A., (2011) Physical and economic consequences of climate

- change in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **108**(7), 2678-2683.
- Clariza, M., Gullà, G., Sorbino, G. (1996) Sui meccanismi di innesco dei soil slip. In: *Int. Conf. Prevention of Hydrogeological Hazards: The Role of Scientific Research (Luino F, ed)*, vol. **1**. Alba: L'Artistica Savigliano pub, 585–597.
 - Clark, W.A. & Hosking, P.L. (1986) Statistical methods for geographers. Wiley, New York, 518pp.
 - Conforti, M., Robustelli, G., Muto, F., Critelli, S. (2012). Application and validation of bivariate GIS-based landslide susceptibility assessment for the Vittravo river catchment (Calabria, south Italy). *Natural Hazards*, **61**(1), 127–141.
 - Conforti, M., Pascale, S., Robustelli, G., Sdao, F. (2014) Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy). *Catena*, **113**, 236–250.
 - Corbi, I., Guida M., Tetamo G., Vallario A. (1996) Considerazioni sul rischio a franare di aree campione del bacino del fiume Biferno (Molise). *Memorie della Società Geologica Italiana*, **51**: 1087-1100, Roma.
 - Corominas, J. & Moya, J. (1999) Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology* **30**: 79–93
 - Cotecchia, F., Santaloia, F., Lollino, P. (2011) Slow landsliding as effect of hydro-mechanical coupled processes: examples of resulting damages and mitigation strategies. *Proceedings of the 2nd Italian Workshop on Landslides* 28–29 September 2011, Naples, Italy.
 - Cotecchia, F., Vitone, C., Santaloia, F., Pedone, G., Bottiglieri, O. (2015) Slope instability processes in intensely fissured clays: case histories in the Southern Apennines. *Landslides*, **12**, 877–893.
 - Cotecchia, V. & Melidoro G. (1974) Some principal geological aspects of the landslides of southern Italy. *Bulletin IAEG*, **9**, 23-32
 - Cotecchia, V., Casarano, D., Polemio, M. (2004) Characterization of rainfall trend and drought periods in Southern Italy from 1821 to 2001. In: *Gaudio, R. (Ed.), Proceedings of 1st Italian–Russian Workshop New Trends in Hydrology*. CNR-GNDICI, Publ. No. 2823, pp. 139–150.
 - Crosta, G.B., Dal Negro, P., Frattini, P. (2003) Soil slips and debris flow on terraced slope. *Natural Hazards and Earth System Science*, **3**, 31–42.
 - Crosta, G.B. & Frattini, P. (2001) Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow. *Proceedings of the 2nd EGS Plinius Conference*, Siena, Italy, October 2000, pp. 463-487.

- Crozier, M.J., 1986. *Landslides: Causes, Consequences, and Environment*. Croom Helm, London. 252 pp.
- Crozier, M.J. (1997) The climate–landslide couple: a southern hemisphere perspective. *Paleoclimate Research*, **19** (ESF Special Issue 12), 329–350.
- Crozier, M.J. (1999) Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the antecedent water status model. *Earth Surface Processes and Landforms*, **24**, 825–833.
- Crozier, M.J. (2010) Deciphering the effect of climate change on landslide activity: a review. *Geomorphology*, **124**, 260–267.
- Cruden, D.M. & Varnes, D.J. (1996) Landslide types and processes. In: *Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), Landslides, Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board Special Report 247, Washington D.C., 36–75.
- Dai, F. & Lee, C. (2002) Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, **42**(3-4), 213–228.
- Dazzaro, L., Di Nocera, S., Pescatore, T., Rapisardi, L., Romeo, M., Russo, B., Senatore, M.R., Torre, M. (1988) Geologia del margine della catena appenninica tra il Fiume Fortore ed il Torrente Calaggio (Monti della Daunia-Appennino meridionale). *Memorie della Societa Geologica Italiana*, **41**, 411–422
- Dazzaro, L. & Rapisardi, L. (1996) "Schema geologico del margine appenninico tra il F. Fortore e il F. Ofanto", *Memorie della Societa Geologica Italiana*, **51**(1), 143-147.
- De Angelis, A. (2008) Analisi quantitativa dei processi erosivi di versante nei bacini idrografici molisani a forte componente pelitica. Tesi di dottorato, Università degli studi del Molise.
- Defries, R.S. & Townshend J.R.G. (1999) Global land cover characterization from satellite data: from research to operational implementation. *Global Ecology and Biogeography*, **8**, 367–379.
- Del Prete, M., (1993) Examples of mudslides hazard in the Southern Apennines (Italy). *Annali di Geofisica*, **36** (1), 271–276.
- Devkota, K.C., Regmi, A.D., Pourghasemi, H.R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I.C., Dhital, M.R., Althuwaynee, O.F. (2013) Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling-Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Natural Hazards*, **65**, 135–165.
- Di Gregorio, A. & Jansen, L. J. M. (2000). *Land-cover classification system (LCCS): Classification concepts and user manual*. FAO/UNEP/Cooperazione Italiana, Rome. URL: <<http://www.fao.org/DOCREP/003/X0596E/X0596e00.htm>>.

- Di Maio, C., Vassallo, R., Vallario, M., Pascale, S., Sdao, F. (2010) Structure and kinematics of a landslide in a complex clayey formation of the Italian Southern Apennines. *Engineering Geology*, **116**, 311–322.
- Di Martino, P. (1996) Storia del paesaggio forestale del Molise (sec. XIX-XX). Lampo, Campobasso, 171 pp.
- Diodato, N. (2007) Climatic fluctuations in southern Italy since the 17th century: reconstruction with precipitation records at Benevento. *Climatic Change*, **80**, 411–431.
- Doglioni, A., Fiorillo, F., Guadagno, F.M., Simeone, V. (2012) Evolutionary polynomial regression to alert rainfall-triggered landslide reactivation. *Landslides*, **9**, 53–62.
- Domínguez-Cuesta, M.J, Jiménez-Sánchez, M., Colubi, A., González-Rodríguez, G. (2010) Modelling shallow landslide susceptibility: a new approach in logistic regression by using favourability assessment. *International Journal of Earth Science*, **99**, 661–674.
- Dube, F., Nhapi, I., Murwira, A., Gumindoga, W., Goldin, J., Mashauri, D.A. (2014) Potential of weight of evidence modelling for gully erosion hazard assessment in Mbire District – Zimbabwe. Parts A/B/C 67–69, 145–152.
- Dunn, C.P., Sharpe, D.M., Guntenspergen, G.R., Stearns, F., Yang, Z. (1991) Methods for analyzing 17 temporal changes in landscape pattern. In: *Quantitative Methods in Landscape Ecology*; Turner, I.M.G.; Gardner, R.H., Eds.; Springer-Verlag: New York, NY, USA, 173–198 .
- Efron, B., 1979. Bootstrap methods: another look at jackknife. *The Annals of Statistics* **7**, 1–26.
- Efron, B. & Tibshirani, R.J., (1994) An Introduction to the Bootstrap. Chapman and Hall, New York.
- Ercanoglu, M. & Gokceoglu, C. (2004) Landslide Susceptibility Zoning North of Yenice (NW Turkey) by Multivariate Statistical Techniques. *Natural Hazards*, **32**, 1–23.
- ERDAS Image software, 2015. <http://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-imagine>
- Erener, A., Sebnem, H., Duzgun, B. (2010) Improvement of statistical landslide susceptibility mapping by using spatial and global regression methods in the case of More and Romsdal (Norway). *Landslides*, **7**, 55–68.
- Falcucci, A., Maiorano, L., Boitani, L. (2007) Changes in land-use/land-cover patterns in Italy and their implications for biodiversity conservation. *Landscape Ecology*, **22**(4), 617–631.

- Fearon, R.E. & Coop, M.R. (2003) The influence of landsliding on the behaviour of a structurally complex clay. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, **35**, 25–32.
- Federico, S., Pasqualoni, L., Avolio, E., Bellecci, C. (2010) Brief communication “Calabria daily rainfall from 1970 to 2006”. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **10**, 717–722.
- Fell, R., Corominas J, Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z. et al (2008) Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, **102**, 85–98.
- Fernandez, T., Irigaray, C., Hamdouni, R.E., Chacon, J. (2003) Methodology for landslide susceptibility mapping by means of a GIS. Application to the Contraviesa area (Granada, Spain). *Natural Hazards*, **30**, 297–308
- Ferrara, C., Barone, P. M., Salvati, L. (2015) Unravelling landslide risk: Soil susceptibility, agro-forest systems and the socio-economic profile of rural communities in Italy. *Soil Use and Management*, **31**(2), 290–298.
- Festa, A., Vezzani, L., Ghisetti, F. (2006) Note illustrative della Carta Geologica del Molise. Scala 1:100.000. Regione Molise, pp 93.
- Fiorucci, F., Cardinali, M., Carlà, R., Rossi, M., Mondini, A.C., Santurri, L., Ardizzone F., Guzzetti, F. (2011) Seasonal landslide mapping and estimation of landslide mobilization rates using aerial and satellite images. *Geomorphology*, **129**(1-2), 59–70.
- Flamenco-Sandoval, A., Ramos, M. M., Masera, O. R. (2007) Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest. *Biological Conservation*, **138**(1–2), 131–145.
- Fookes, P.G., Dale, S.G., Land, J.M. (1991) Some observations on a comparative aerial photography interpretation of a land- slipped area. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **24**, 249–265.
- Forman, R.T.T. (1995) Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecoogy*, **10**, 133-142.
- Franceschini, S. (2012) Analisi critica di modelli previsionali per le frane in Emilia Romagna. Tesi di dottorato, Università di Bologna, Italia.
- Galve, J.P., Cevasco, A., Brandolini, P., Soldati, M. (2015) Assessment of shallow landslide risk mitigation measures based on land use planning through probabilistic modelling. *Landslides*, **12**, 101–114.
- García-Ruiz, J.M., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., Beguería, S. (2013) Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology*, **198**, 20–36.

- Gariano, S. L., Brunetti, M. T., Iovine, G., Melillo, M., Peruccacci, S., Terranova, O., Vennari C., Guzzetti, F. (2015) Calibration and validation of rainfall thresholds for shallow landslide forecasting in Sicily, southern Italy. *Geomorphology*, **228**, 653–665.
- Gariano, S.L., Iovine G., Brunetti, M.T., Peruccacci, S., Luciani, S., Bartolini, D., Palladino, M.R., Vessia, G., Viero, A., Vennari, C., Antronico, L., Deganutti, A.M., Luino, F., Parise, M., Terranova, O., Guzzetti, F. (2012) Populating a catalogue of rainfall events that triggered shallow landslides in Italy. *Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, **21**, 396–398
- Ghestem, M., Sidle, R.C., Stokes, A. (2011) The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability. *Bioscience*, **61**(11):869–879.
- Ghimire, M. (2001) Geo-hydrological hazard and risk zonation of Banganga watershed using GIS and remote sensing. *Journal of Nepal Geological Society*, **23**, 99–110
- Giannecchini, R. (2005) Rainfall triggering soil slips in the southern Apuane Alps (Tuscany, Italy). *Advances in Geosciences*, **2**, 21-24.
- Giannecchini, R. (2006) Relationship between rainfall and shallow landslides in the southern Apuan Alps (Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **6**, 357–364
- Glade, T. (2003) Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. *Catena*, **51**, 297–314.
- Glade, T., Anderson, M., Crozier, M. J. (2005) Landslide Hazard and Risk. (T. Glade, M. Anderson & M. J. Crozier, Eds.). Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd. doi:10.1002/9780470012659
- Gorsevski, P.V., Jankowski, P. (2010) An optimized solution of multi-criteria evaluation analysis of landslide susceptibility using fuzzy sets and Kalman filter. *Computers and Geosciences*, **36**, 1005–1020.
- Greco, R., Sorriso-Valvo, M., 2013. Influence of management of variables, sampling zones and land units on LR analysis for landslide spatial prevision. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **13**, 2209–2221.
- Green, W.H. & Ampt, G.A. (1911) Studies on soil physics, part I, the flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, **4**, 1 - 24.
- Guadagno, F.M. (1991) Debris flows in the Campanian volcanoclastic soil (Southern Italy). In: *Proceedings International Conference on slope stability*. Isle of Wight: Thomas Telford, 125–130.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P. (1999) Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, **31**, 181 - 216.

- Guzzetti, F., Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Reichenbach, P., (2002) Power-law correlations of landslide areas in Central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, **195**, 169–183.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F. (2005) Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, **72**(1–4), 272–299.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., (2006a) Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, **81**, 166–184.
- Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M. (2006b) Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **6**, 115–131.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P. (2007) Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **98**, 239–267
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P. (2008) The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, **5**(1), 3–17.
- Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Rossi, M., Valigi, D. (2009) Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, **279**, 222–229.
- Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K.T. (2012) Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Review*, **112**, 42–66.
- Guzzetti, F. (2015) Forecasting natural hazards, performance of scientists, ethics, and the need for transparency. *Toxicological & Environmental Chemistry*, **4**(1), 1–17.
- Hippolyte, J.C., Angelier, J., Barrier, E. (1995) Compressional and extensional tectonics in an arc system: example of the Southern Apennines. *Journal of Structural Geology*, **17**, 2, 1725–1740.
- Highland, L.M., Bobrowsky, P. (2008) The landslide handbook: a guide to understanding landslides. U.S. Geological Survey, Circular 1325, 129pp.
- Hippolyte, J.C., Angelier, J., Roure, F., 1994. A mayor geodynamic change revealed by Quaternary stress patterns in the southern Apennines (Italy). *Tectonophysics*, **230**, 199–210.
- Hong, Y., Adler, R., Huffman, G. (2006) Evaluation of the potential of NASA multi-satellite precipitation analysis in global landslide hazard assessment. *Geophysical Research Letters*, **33**(22), L22402.
- Hosmer, D.W. & Lemeshow, S. (2000) Introduction to the logistic regression model. *Applied Logistic Regression*, 2nd ed. Wiley, New York. 373 pp.

- Hossain, M.S., Chowdhury, S.R., Das, N.G., Rahaman, M.M. (2007) Multi-criteria evaluation approach to GIS-based and suitability classification for tilapia farming in Bangladesh. *Aquaculture International*, **15**, 425–443.
- Hungr, O., Evans S.G., Bovis, M., Hutchinson, J.N. (2001) Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geosciences*, **8**, 221–238.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014) The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, **11**, 167–194.
- Hussin, H.Y., Zumpano, V., Reichenbach, P., Sterlacchini, S., Micu, M., van Westen, C., Bălteanu, D. (2016) Different landslide sampling strategies in a grid-based bi-variate statistical susceptibility model. *Geomorphology*, **253**, 508–523.
- Hutchinson, J.N. (1988) General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne, **1**, 3–35
- Iadanza, C. (2014) Metodologie di analisi e definizione di soglie di eventi pluviometrici che hanno innescato colate rapide e frane superficiali in un'area dell'arco alpino nord-orientale. Tesi di dottorato, Università degli studi di Roma "La Sapienza".
- ILWIS Academic 3.3, http://www.ilwis.org/open_source_gis_ilwis_download.htm
- Innes, J.L. (1983) Debris flows. *Progress in Physical Geography*, **7**, 469–501.
- Iovine, G.G.R., Greco, R., Gariano, S.L., Pellegrino, A.D., Terranova, O.G., (2014) Shallow-landslide susceptibility in the Costa Viola mountain ridge (southern Calabria, Italy) with considerations on the role of causal factors. *Natural Hazards*, **73**, 111–136.
- ISPRA (2013) Dati del Sistema Informativo di Carta della Natura alla scala 1:250.000.
- ISPRA (2015a) Il consumo di suolo in Italia (Rapporti Ispra, 218/2015).
- ISPRA (2015b) Dissesto idrogeologico in Italia, pericolosità e indicatori di rischio. ISPRA Edition. (ISBN_978-88-448-0751-1). 149p.
- ISTAT, (1954) 9° Censimento generale della popolazione: 4 novembre 1951 / Istituto centrale di statistica, Roma
- ISTAT, (1963) 10° Censimento generale della popolazione 15 ottobre 1961, Vol. I - Dati riassuntivi comunali e provinciali sulla popolazione e sulle abitazioni, Roma.
- ISTAT, (1972) 11° Censimento generale della popolazione: 24 ottobre 1971, Roma.
- ISTAT, (1982) 12° Censimento generale della popolazione: 25 ottobre 1981 / Istituto centrale di statistica, Roma.
- ISTAT, (1992) 13° censimento generale della popolazione e delle abitazioni: 20 ottobre 1991, Roma.

- ISTAT, (2001) 14° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni, Risorsa elettronica sito Istat www.istat.it, Roma.
- ISTAT, (2011) 15° Censimento della popolazione e delle abitazioni: 9 ottobre 2011 - Struttura demografica della popolazione. Dati definitivi, Roma..
- ISTAT, (2012) I censimenti nell'Italia unita - Le fonti di stato della popolazione tra il XIX e il XXI secolo, Annali di Statistica, Anno 141, serie XII, Vol. 2, Roma.
- ITC (2001) ILWIS 3.0 Academic–user’s guide. ITC, Enschede, p 520
- Iverson, R.M. (2000) Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, **36** (7), 1897-1910.
- Izzo, M., Aucelli, P.P.C., Mazzarella, A. (2004) Recent changes in rainfall and air temperature at Agnone (Molise — Central Italy). *Annals of Geophysics*. **47**, 1689–1698.
- Jansen, L.J.M. (2005) Harmonisation of land-use class sets to facilitate compatibility and comparability of data across space and time. 11th CERES International Symposium, 13-14 December 2005, Chiba, Japan.
- Jibson, R.W. (1989) Debris flow in southern Porto Rico. *Geological Society of America*, special paper **236**, 29–55.
- JRC (2012) Landslide inventories in Europe and policy recommendations for their interoperability and harmonisation. Report EUR 25666 EN.
- Kamusoko, C., Wada, Y., Furuya, T., Tomimura, S., Nasu, M., Homsysavath, K. (2013) Simulating future forest cover changes in Pakxeng district, Lao people’s democratic republic (PDR): implications for sustainable forest management. *Land*, **2**, 1–19..
- Keefer, D.K., Wilson, R.C., Mark, R.K., Brabb, E.E., Brown, W.M III., Ellen, S.D., Harp, E.L., Wiczoreck, G.F., Alger, C.S., Zarkin, R.S. (1987) Real-time landslide warning during heavy rainfall. *Science*, **238**, 921–926.
- Khosrovyan, A., Rodríguez-Romero, A., Ramos, M.A., Del Valls, T.A., Riba, I. (2015) Comparative analysis of two weight-of-evidence methodologies for integrated sediment quality assessment. *Chemosphere*, **120**, 138–144.
- Kleinbaum, D.G., Klein, M. (2002) Logistic regression. A self-learning text. Statistics for biology and health. Springer, New york.
- Köppen, W., (1936) Das geographische System der Klimate. In: *Köppen, W., Geiger, R. (Eds.), Handbuch der Klimatologie. Band 5, Teil C. Gebrüder Bornträger, Berlin*, 1–46.
- Kovats, R.S., Valentini, R., Bouwer, L.M., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., Rounsevell, M., Soussana, J.F. (2014): Europe. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to*

- the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1267-1326.
- Lagomarsino, D., Segoni, S., Fanti, R., Catani, F. (2013) Updating and tuning a regional scale landslide early warning system. *Landslides*, **10**, 91–97.
 - Lambin, E.F., Turner, II B.L., Geist, H., Agbola, S., Angelsen, A., Bruce, J.W., Coomes, O., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P.S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E.F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P.S., Richards, J.F., Skånes, H., Steffen, W., Stone, G.D., Svedin, U., Veldkamp, T., Vogel, C., Xu, J. (2001) The Causes of Land-Use and Land-Cover Change: Moving beyond the Myths. *Global Environmental Change*, **11**, no.4:5-13.
 - Lamanna C., Casarano D., Wasowski J. (2009) Cambiamenti dell'uso del suolo e aumento dell'attività franosa nel territorio di Rocchetta Sant'Antonio (Appennino Dauno). *Il Quaternario*, **22**(2), 139-156.
 - Lanzaframe G. & Tortorici L. (1976) Osservazioni geologiche sul medio e basso bacino del F. Biferno (Molise, Italia centro-meridionale). *Geologica Romana*, **15**, 199-222.
 - Larsen, J.L., Montgomery, D.R., Korup, O. (2010) Landslide erosion controlled by hillslope material. *Nature Geoscience*, **3**, 247–251.
 - Lasanta-Martínez, T., Vicente-Serrano, S.M., Cuadrat-Prats, J.M. (2005) Mountain Mediterranean landscape evolution caused by the abandonment of traditional primary activities: A study of the Spanish Central Pyrenees. *Applied Geography*, **25**(1), 47–65.
 - Lee, S. & Talib, J.A. (2005) Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, **47**, 982–990.
 - Lee, S. & Pradhan, B. (2007) Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, **4**, 33–41.
 - Leroy, E. (1996) Landslide hazard-Risk maps at different scales: objectives, tools and developments. In *Proc. VII Int. Symp. Landslides, Trondheim*, **1**, 35-52.
 - Leroueil, S., Locat, J., Vaunat, J., Picarelli, L., Lee, H., Faure, R. (1996) Geotechnical characterization of slope movements. In: *Senneker K (ed) Landslides*. Balkema, Rotterdam **1**, 53–74.
 - Liu, J. & Taylor, W.W. (2002) Integrating Landscape Ecology into Natural Resource Management. *Cambridge University Press*, Cambridge.

- Loiacono, P., Amoruso, G., Brunetti, M., Dragone, V., Guzzetti, F., Parise M., Peruccacci, S., Trabace, M., Vennari, C., Vessia, G. (2014) Soglie pluviometriche per l'insacco di fenomeni franosi alla scala nazionale e regionale: il caso del Sub-Appennino Dauno (Puglia Settentrionale). *Geologia dell'ambiente*, **2**, pp. 147-150.
- Lorente, A., García-Ruiz, J.M., Beguería, S., Arnáez, J. (2002) Factors explaining the spatial distribution of hillslope debris flows. A case study in the Flysch sector of the Central Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, **22**, 32–39
- Lumb, P. (1975) Slope failure in Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, **8**, 31–65.
- Maeda, E. E., de Almeida, C. M., de Carvalho Ximenes, A., Formaggio, A. R., Shimabukuro, Y. E., Pellikka, P. (2011) Dynamic modeling of forest conversion: Simulation of past and future scenarios of rural activities expansion in the fringes of the Xingu National Park, Brazilian Amazon. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **13**(3), 435–446.
- Magliulo, P., Di Lisio, A., Russo, F. (2008) Comparison of GIS-based methodologies for the landslide susceptibility assessment. *Geoinformatica*, **13**, 253–265.
- Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (2004) Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, **29**, 687–711.
- Malek, Z., Boerboom, L., Glade, T. (2015) Future Forest Cover Change Scenarios with Implications for Landslide Risk: An Example from Buzau Subcarpathians, Romania. *Environmental Management*, **56**, 1228–1243.
- Mancini, F., Ceppi, C., Ritrovato, G. (2010) System Sciences GIS and statistical analysis for landslide susceptibility mapping in the Daunia area, Italy. *Natural Hazards and Earth System Science*, **10**, 1851–1864.
- Marchetti, M., Bertani, R., Corona, P., Valentini, R. (2012) Changes of forest coverage and land uses as assessed by the inventory of land uses in Italy. *Forest@ - Rivista Di Selvicoltura Ed Ecologia Forestale*, **9**(4), 170–184.
- Martelloni, G., Segoni, S., Fanti, R., Catani, F., (2012) Rainfall thresholds for the forecasting of landslide occurrence at regional scale. *Landslides*, **9** (4), 485–495.
- Mazzoleni, S., Di Pasquale, G., Mulligan, M., DI Martino, P., Rego, F. (2004) Recent dynamics of the mediterranean vegetation and landscape. Chichester, UK: Wiley & SonsLtd.
- Melillo, M., Brunetti, M.T., Peruccacci S., Gariano, S.L., Guzzetti, F. (2014) An algorithm for the objective reconstruction of rainfall events responsible for landslides. *Landslides*, **12**(2), 311-320.

- Migliorini, C.I. (1950) Suddivisione geografica dell'Appennino per uso geografico. Una proposta. *Bollettino della Società geologica italiana*, **68** (1949): 95-96, Roma.
- Monteiro, A. T., Fava, F., Hiltbrunner, E., Della Marianna, G., Bocchi, S. (2011) Assessment of land cover changes and spatial drivers behind loss of permanent meadows in the lowlands of Italian Alps. *Landscape and Urban Planning*, **100**(3), 287–294.
- Montgomery, D.R. & Dietrich, W.E. (1994) A physically based model for the topographic control on shallow landsliding, *Water Resources Research*, **30**, 1153-1171.
- Montone, P., Amato, A., Pondrelli, S., 1999. Active stress map of Italy. *Journal of Geophysical Research*, **104**(25), 595–610.
- Morgenstern, N.R. (1992) The evaluation of slope stability: a 25 year perspective. In: *Seed RB, Boulanger RW* (eds) *Stability and performance of slopes and embankments*, ASCE *Geotechnical Special Publication*, **31**, 1:1–26
- Moser, M. & Hohensinn, F. (1983) Geotechnical aspects of soil slips in Alpine regions. *Engineering Geology*, **19**, 185–211.
- Mossa, S., Capolongo, D., Pennetta, L., Wasowski, J. (2005) A GIS- based assessment of landsliding in the Daunia Apennines, Southern Italy, in: *Proceedings of the conference “Mass movement hazard in various environments”*, Polish Geological Institute special papers, **20**, 86–91.
- Mostardini, F. & Merlini, S. (1986) Appennino centro-meridionale: sezioni geologiche e proposta di modello strutturale. *Memorie della Società Geologica Italiana*, **35**, 177-202.
- Munsu, M., Malaviya, S., Oinam, G., Joshi, P. K. (2010) A landscape approach for quantifying land-use and land-cover change (1976–2006) in middle Himalaya. *Regional Environmental Change*, **10**(2), 145–155.
- Nandi, A. & Shakoor, A. (2009) A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Engineering Geology*, **110**(1-2), 11–20.
- Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y., Durmaz, S. (2008) Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). *Geomorphology*, **94**, 401–418.
- Nicholson, D. T. (2004) Hazard assessment for progressive, weathering-related breakdown of excavated rockslopes. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, **37**, 327-346.
- Ogniben, L. (1969) Schema introduttivo alla geologia del confine calabro-lucano. *Memorie della Società Geologica Italiana*, **8**, 453-763.

- Ohlmacher, G.C. & Davis, J.C. (2003) Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering Geology* **69**, 331–343.
- Ottaviano, M., De Ioanni, M., Di Martino, O., Montagnoli, A., Roskopf, C.M., Aucelli P.P.C (2001) Analisi delle relazioni esistenti tra i fenomeni di dissesto idrogeologico ed i fattori geoambientali ed antropici nel bacino del Torrente Rivo (Molise). In: *Atti del Convegno “Gis strumenti avanzati ed applicazioni per la gestione ed il controllo del territorio”*, Benevento, 14 Novembre 2001.
- Parise, M. & Wasowski, J. (2000) Fenomeni di dissesto nell’Appennino Dauno, ed implicazioni per il patrimonio archeologico e storico-culturale. *Atti del Convegno “Condizionamenti geologici e geotecnici nella Conservazione del Patrimonio Storico Culturale”*, Torino, 8-9 giugno 2000, 749-756.
- Parise, M. (2003) Considerazioni sulla franosità dell’Appennino Dauno (Puglia) sulla base dell’elaborazione di carte di attività delle frane. *Quaderni di Geologia Applicata* **10** (2): 133-145.
- Parise, M., Federico, A., Palladino G. (2012) Historical evolution of multi-source mudslides. In: *Eberhardt E., Froese C., Turner A.K. & Lerouil S. (Eds.), Landslides and Engineered Slopes. Protecting Society through Improved Understanding. Proceedings 11th Int. Symp. Landslides, Banff (Canada), 3-8 June 2012*, 1,401-407.
- Parise, M., Pisano, L., Vennari, C., Vessia, G. (2015) La realizzazione di soglie pluviometriche per il possibile innesco di frane indotte dalla pioggia in puglia, e la validazione delle previsioni del sistema di allerta nazionale per la previsione di frane indotte dalla pioggia (SANF) in Puglia. Relazione finale relativa alle attività dell'istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI) nell'ambito della convenzione con Regione Puglia, Servizio Protezione Civile del 27/03/2015, 45 pp.
- Parotto, M. & Praturlon, A. (2004) The southern Apenninic arc. In: *Geology of Italy* (ed. U. Crescenti, S. D'Offizi, S. Merlino, L. Sacchi) Special Volume of the Italian Geological Society for the IGC 32 Florence-2004, 33-58.
- Patacca, E. & Scandone, P. (2001) Late thrust propagation and sedimentary response in the thrust belt-foredeep system of the Southern Apennines (Pliocene-Pleistocene). In: *Anatomy of an Orogen: The Apennines and Adjacent Mediterranean Basins* (ed. G.B. Vai & Martini I.P.) Kluwer Academic Publication, 401-440.
- Patacca, E. & Scandone, P. (2007) Geology of the Southern Apennines. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, Special Issue, **7**, 75-119.

- Pellicani, R., van Westen, C.J., Spilotro, G. (2013) Assessing landslide exposure in areas with limited landslide information. *Landslides*, **11**, 463-480.
- Pelorosso, R., Della Chiesa S., Boccia, L. (2007) Lettura storica del cambiamento d'uso dei suoli. *Estimo e Territorio*, **12**, 28-35.
- Pelorosso, R. (2008) Land cover e land use change di medio-lungo periodo in provincia di Rieti: analisi e modellizzazione delle dinamiche territoriali. Tesi di dottorato, Università degli studi della Tuscia di Viterbo, Italia.
- Pelorosso, R., Della Chiesa, S., Tappeiner, U., Leone, A., Rocchini, D. (2011) Stability analysis for defining management strategies in abandoned mountain landscapes of the Mediterranean basin. *Landscape and Urban Planning*, **103**(3-4), 335–346.
- Persichillo, M.G., Bordoni, M., Meisina, C. (2017) The role of land use changes in the distribution of shallow landslides. *Science of The Total Environment*, **574**, 924–937.
- Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Luciani, S., Vennari, C., Guzzetti, F. (2012) Lithological and seasonal control on rainfall thresholds for the possible initiation of landslides in central Italy. *Geomorphology*, **139-140**, 79–90.
- Petley, D.J. (1984) Shear strength of over-consolidated fissured clay. *Proceedings of the international symposium on landslides*, Toronto, **2**, 167–172.
- Petschko, H., Brenning, A., Bell, R., Goetz, J., Glade, T. (2014) Assessing the quality of landslide susceptibility maps – case study Lower Austria. *Natural Hazards and Earth System Science*, **14**, 95–118. doi: 10.5194/nhess-14-95-2014
- Piacentini, D., Troiani, F., Soldati, M., Notarnicola, C., Savelli, D., Schneiderbauer, S., Strada, C. (2012) Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (south-eastern Alps, Italy). *Geomorphology*, **151-152**, 196–206.
- Picarelli, L. & Olivares, L. (2004) Mechanical behaviour of highly sheared clay shales. *Advances in geotechnical engineering: the Skempton conference—advances in geotechnical engineering*, ICEI, pp 580-591
- Picarelli, L., Urciuoli, G., Ramondini, M., Comegna, L. (2005) Main features of mudslides in tectonised highly fissured clay shales. *Landslides* **2**, 15–30.
- Picarelli, L., Urciuoli, G., Mandolini, A., Ramondini, M. (2006) Softening and instability of natural slopes in highly fissured plastic clay shales. *Natural Hazards and Earth System Science*, **6**, 529–539.
- Piccarreta, M., Capolongo, D., Boenzi, F., (2004) Trend analysis of precipitation and drought in Basilicata from 1923 to 2000 within a southern Italy context. *International Journal of Climatology*, **24**, 907–922.

- Piccarreta, M., Capolongo, D., Miccoli, M.N., Bentivenga, M. (2012) Global change and longterm gully sediment production dynamics in Basilicata, southern Italy. *Environmental Earth Sciences*, **67**, 1619–1630.
- Piccarreta, M., Pasini, A., Capolongo, D., Lazzari, M., (2013) Changes in daily precipitation extremes in the Mediterranean from 1951 to 2010: the Basilicata region, southern Italy. *International Journal of Climatology*, **33**, 3229–3248.
- Piciullo, L., Gariano, S. L., Melillo, M., Brunetti, M. T., Peruccacci, S., Guzzetti, F., Calvello, M. (*in press*) Definition and performance of a threshold-based regional early warning model for rainfall-induced landslides. *Landslides*, doi:10.1007/s10346-016-0750-2
- Pieri, P., Gallicchio, S., Moretti, M. (2011) Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 50.000. F° 407 “San Bartolomeo in Galdo”. ISPRA – Servizio Geologico d'Italia.
- Pignone, S., Del Maschio, L., Gozza, G., Pizziolo, M. (2005) Determinazione di soglie pluviometriche per l'innescio di fenomeni franosi nell'Appennino settentrionale. Rapporto ARPA SIM e Regione Emilia Romagna Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (33 pp.)
- Piguet, E. (2013) From “primitive migration” to “climate refugees” - the curious fate of the natural environment in migration studies. *Annals of the Association of American Geographers*, **103**, 148–162.
- Pinna, M. (1970) Contributo alla classificazione del clima d'Italia, in «*RGI*». II, 129-152.
- Pisano, L., Vennari, C., Vessia, G., Trabace, M., Amoruso, G., Loiacono, P., Parise, M. (2015) Data collection for reconstructing empirical rainfall thresholds for shallow landslides: challenges and improvements in the Daunia Sub-Appennine (Southern Italy). *Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, **35**, 236–239.
- Pisano L., Zumpano V., Aucelli P.P.C., Parise M., Roskopf C.M. (2016a) Landslide susceptibility zonation at the regional scale: the Molise case study (Italy). *Rendiconti On line Società Geologica Italiana*, **41**, 183-186.
- Pisano, L., Dragone, V., Vennari, C., Vessia, G., Parise, M. (2016b) The influence of slope instability processes in demographic dynamics of landslide-prone rural areas. In: *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice* (pp. 1655–1660). CRC Press.
- Polemio, M. & Casarano, D., (2004) Rainfall and drought in southern Italy (1821–2001) The Basis of Civilization. *Water Science IAHS Publications* **286**, 217–227.
- Polemio, M. & Casarano, D., (2008) Climate change, drought and groundwater availability in southern Italy. *Geological Society London Special Publications*, **288**, 39–51.

- Pourghasemi H.R., Pradhan B., Gokceoglu C., Moezzi K.D. (2012) Landslide Susceptibility Mapping Using a Spatial Multi Criteria Evaluation Model at Haraz Watershed, Iran. In: *Buchroith- ner M, Pradhan B (eds) Terrigenous mass movements*. Springer, Berlin, pp 23–49.
- Pourghasemi, H.R., Moradi, H.R., Fatemi Aghda, S.M., Gokceoglu, C., Pradhan, B., (2014). GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, **7**, 1857–1878.
- Pradhan, B. & Lee, S. (2009) Landslide risk analysis using artificial neural network model focussing on different training sites. *International Journal of Physical Sciences*, **4**, 1–15.
- Pradhan, A.M.S. & Kim, Y.T. (2014) Relative effect method of landslide susceptibility zonation in weathered granite soil: A case study in Deokjeok-ri Creek, South Korea. *Natural Hazards*, **72**, 1189–1217.
- Promper, C., Puissant, a., Malet, J.-P., Glade, T. (2014) Analysis of land cover changes in the past and the future as contribution to landslide risk scenarios. *Applied Geography*, **53**, 11–19.
- Promper, C., Gassner, C., Glade, T. (2015) Spatiotemporal patterns of landslide exposure – a step within future landslide risk analysis on a regional scale applied in Waidhofen/Ybbs Austria. *International journal disaster risk reduction*, **12**, 25–33.
- Promper, C. & Glade, T., 2016. Multilayer-exposure maps as a basis for a regional vulnerability assessment for landslides: applied in Waidhofen/Ybbs, Austria. *Natural Hazards*, **82**, 111–127.
- Pueyo, Y. & Begueria, S. (2007) Modelling the rate of secondary succession after farmland abandonment in a Mediterranean mountain area. *Landscape and Urban Planning*, **83**(4), 245–254.
- Raines, G.L. (1999) Evaluation of weights of evidence to predict epithermal-gold deposits in the great basin of the western United States. *Natural Resources Research*, **8**(4), 257–276.
- Rappelli F., Luino F., Nigrelli G., Bidoccu M., Cirio C.G., Di Palma M., Missaglia M., Fassi P. (2008) Definizione delle soglie pluviometriche d’innescò di frane superficiali e colate torrentizie: accorpamento per aree omogenee. IReR, codice: 2007B023, 125 pp.
- Regmi, N.R., Giardino, J.R., Vitek, J.D. (2010) Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, {USA}. *Geomorphology*, **115**, 172–187.
- Regmi, N.R., Giardino, J.R., McDonald, E.D., Vitek, J.D. (2014) A comparison of logistic regression-based models of susceptibility to landslides in western Colorado, USA. *Landslides*, **11**, 247–262.

- Reichenbach, P, Cardinali, M, De Vita, P, Guzzetti, F (1998) Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (Central Italy). *Environmental Geology*, **35**(2–3),146–159.
- Reichenbach, P., Busca, C., Mondini, a C., & Rossi, M. (2014) The Influence of Land Use Change on Landslide Susceptibility Zonation: The Briga Catchment Test Site (Messina, Italy). *Environmental Management*, **54**(6),1372-84.
- Rib, H.T. & Liang, T. (1978) Recognition and identification. In: *Schuster, R.L., Krizek, R.J.* Eds., Landslides analysis and control. Washington Transportation Research Board, Special Report 176. National Academy of Sciences, WA, pp. 34–80.
- Rocchini, D. & Di Rita, A. (2005) Relief effects on aerial photos geometric correction. *Applied Geography*, **25**, 159–168.
- Rocchini, D., Perry, G. L. W., Salerno, M., Maccherini, S., Chiarucci, A. (2006) Landscape change and the dynamics of open formations in a natural reserve. *Landscape and Urban Planning*, **77**, 167–177.
- Romero-Calcerrada, R. & Perry, G.L.W. (2004) The role of land abandonment in landscape dynamics in the SPA Encinares del río Alberche y Cofio, Central Spain, 1984–1999. *Landscape and Urban Planning*, **66**(4), 217–232.
- Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Mondini, A.C., Peruccacci, S. (2010) Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts. *Geomorphology*, **114**(3), 129–142.
- Rossi, M., Peruccacci, S., Brunetti, M.T., Marchesini, I., Luciani, S., Ardizzone, F., Balducci, V., Bianchi, C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Mondini, A.C., Reichenbach, P., Salvati, P., Santangelo, M., Bartolini, D., Gariano, S.L., Palladino, M., Vessia, G., Viero, A., Antronico, L., Borselli, L., Deganutti, A.M., Iovine, G., Luino, F., Parise, M., Polemio, M., Guzzetti, F. (2012) SANF: national warning system for rainfall-induced landslides in Italy. In: *Eberhardt E, Froese C, Turner AK, Leroueil S (eds) Landslides and engineered slopes: protecting society through improved understanding*. Taylor & Francis Group, London, pp. 1895–1899 ISBN 978-0-415- 62123-6
- Roszkopf, C. & Aucelli, P.P.C. (2007) Analisi del dissesto da frana in Molise. In: *Trigila A. (ed) Rapporto sulle frane in Italia*. Il progetto IFFI—Metodologia, risultati e rapporti regionali. Rapporti APAT, pp 493–508.
- Roszkopf, C.M. & Scorpio, V., 2013. Geomorphologic map of the Biferno River valley floor system (Molise, Southern Italy). *Journal of Maps*, **9**, 106–114.
- Saaty, T.L. (1980) The Analytical Hierarchy Process. McGraw Hill, New York

- Saha A.K., Gupta R.P., Sarkar I., Arora M.K., Csaplovics E., (2005). An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation with a case study in the Himalayas. *Landslides*, **2**, 61–69.
- Salvati, P., Bianchi, C., Rossi, M., Guzzetti, F., (2010) Societal landslide and flood risk in Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **10**, 465–483.
- Sawatzky, D.L., Raines, G.L., Bonham-Carter, G.F.; and Looney CG (2009) Spatial Data Modeller (SDM): ArcMAP 9.3 geoprocessing tools for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks.
- Schuster, R.L. & Krizek, 1978. *Landslides Analysis and Control*, Special Report 176, Washington, DC: Transportation Research Board, National Academy of Sciences.
- Schwarz, M., Lehmann, P., Or, D. (2010) Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes—from a bundle of roots to tree stands. *Earth Surface Processes and Landforms*, **35**, 354–367.
- Scorpio, V., Aucelli, P.P.C., Giano, S.I., Pisano, L., Robustelli, G., Roskopf, C.M., Schiattarella, M., 2015. River channel adjustments in Southern Italy over the past 150 years and implications for channel recovery. *Geomorphology*, **251**, 77–90.
- Scott, D.W. (1992) Multivariate Density Estimation, in: *Theory, Practice and Visualization*, Wiley, New York.
- Segoni, S., Rosi, A., Rossi, G., Catani, F., Casagli, N. (2014a) Analysing the relationship between rainfalls and landslides to define a mosaic of triggering thresholds for regional scale warning systems. *Natural hazards and Earth System Sciences*, **14**, 2637–2648.
- Segoni, S., Rossi, G., Rosi, A., Catani, F. (2014b) Landslides triggered by rainfall: A semi-automated procedure to define consistent intensity–duration thresholds. *Computers & Geosciences*, **63**, 123–131. doi:10.1016/j.cageo.2013.10.009
- Segoni, S., Lagomarsino, D., Fanti, R., Moretti, S., Casagli, N. (2015) Integration of rainfall thresholds and susceptibility maps in the Emilia Romagna (Italy) regional-scale landslide warning system. *Landslides*, **12**(4), 773–785.
- Sgroso, I. & Naso G. (2012) Note illustrative del Foglio 393 "Trivento" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000. ISPRA, Roma.
- Sidle, R. & Ochiai, H. (2006) Landslides: Processes, Predictions and Land Use. American Geophysical Union, Washington D.C.
- Silverman, B.W. (1986) Density Estimation, Chapman and Hall, London.
- Silvestri, F., Vitone, C., d'Onofrio, A., Cotecchia, F., Puglia, R., Santucci de Magistris, F. (2007) The influence of meso-structure on the mechanical behaviour of a marly clay from low

- to high strains. *Geotechnical Tatsuoka Symposium, Rome, Hoe I Ling et al* eds, Soil Stress-Strain Behaviour: Measurement, Modelling, Analysis, Springer, the Netherlands, 333–350.
- Soares-Filho, B. S., Coutinho Cerqueira, G., Lopes Pennachin, C. (2002) DINAMICA - A stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, **154**(3), 217–235.
 - Soeters, R. & van Westen, C.J. (1996) Slope stability recognition, Analysis and Zonation. In *Landslides: Investigation and Mitigation*, Schuster & Turner Eds., Transportation Research Board, Special Report 247, National Research Council, 129-173, 1996.
 - Spizzichino, D., Margottini, C., Trigila, A., Iadanza, C. (2013) Landslide impacts in Europe: weaknesses and strengths of databases available at European and national scale. In: *K. Sassa, P. Canuti, C. Margottini* (eds) *Landslide science and practice Vol. 1 Inventory and hazard assessment*. Springer, pp. 73-80
 - StatPoint Technologies, Inc.: Statgraphics Centurion XVI (2013)
 - Sterlacchini, S., Ballabio, C., Blahut, J., Masetti, M., Sorichetta, A. (2011) Spatial agreement of predicted patterns in landslide susceptibility maps. *Geomorphology*, **125**(1), 51–61.
 - Sujatha, E., Kumaravel, P., Rajamanickam, G.V. (2014) Assessing landslide susceptibility using Bayesian probability-based weight of evidence model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **73**, 147–161.
 - Süzen, M. & Doyuran, V. (2004) A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, **45**, 665–679.
 - Svoray, T., Shoshany, M., Perevolotsky, A. (2003) Monitoring the response of spatially complex vegetation formations to human intervention: a case study from Mediterranean rangelands. *Journal of Mediterranean Ecology*, **4**, 3–12.
 - Swets J.A. (1988) Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, **240**, 1285–1293.
 - Tattoni, C., Ciolli, M., Ferretti, F. (2011) The fate of priority areas for conservation in protected areas: A fine-scale Markov chain approach. *Environmental Management*, **47**(2), 263–278.
 - Terzaghi, K. (1936). Stability of slopes in natural clays. *Proc. 1st Conf. Soil Mech., Harvard* **1**, 161–185.
 - Thiebes, B., Glade, T., Bell, R. (2012) Landslide analysis and integrative early warning-local and regional case studies. In: *Eberhardt E.* (ed) *Landslides and engineered slopes: protecting society through improved understanding*. Taylor & Francis Group, London, pp. 1915–1921.

- Thiery, Y., Malet, J.P., Sterlacchini, S., Puissant A., Maquaire, O. (2007) Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment. *Geomorphology*, **92**, 38–59.
- Tien Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., Dick, O.B. (2012) Landslide susceptibility assessment in the Hoa Binh province of Vietnam: A comparison of the Levenberg-Marquardt and Bayesian regularized neural networks. *Geomorphology*, **171-172**, 12–29.
- Tien Bui, D., Tuan, T.A, Klempe, H., Pradhan, B., Revhaug, I. (2016) Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. *Landslides*, **13**, 361–378.
- Torta, G. (2004) Consequences of rural abandonment in a northern Apeninnes landscape (Tuscany Italy). In *S. Mazzoleni, d. P. G. Mulligan, M. Martino, & P. F. Rego (Eds.)*, Recent dynamics of the mediterranean vegetation and landscape (pp. 167–178). Chichester, UK: Wiley & Sons Ltd.
- Trigila, A., Iadanza, C., Spizzichino, D. (2010) Quality assessment of the Italian Landslide Inventory using GIS processing. *Landslides, Journal of the International Consortium on Landslides*, **7** (4), 455-470.
- Trigila, A. & Iadanza, C. (2012) The national landslide inventory, landslide events, impacts and mitigation measures in Italy. In: *E. Eberhardt, Froese C., Turner A.K., Leroueil S.* (eds) *Landslides and Engineered Slopes. Protecting Society through Improved Understanding*. Vol. **1**, pp. 273-278.
- Trigila, A., Iadanza, C., Munafò, M., Marinosci, I. (2014) Population Exposed to Landslide and Flood Risk in Italy. In: *Lollino G., Manconi A., Guzzetti F., Culshaw M., Bobrowsky P., Luino F.* (eds) *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5*, Springer, pp 843-848.
- Trigila, A., Iadanza, C., Esposito, C., Scarascia-Mugnozza, G. (2015) Comparison of Logistic Regression and Random Forests techniques for shallow landslide susceptibility assessment in Giampileri (NE Sicily, Italy). *Geomorphology*, **249**, 119–136.
- Trnka, M., Kocmánková E., Baleka, J., Eitzinger J., Ruget, F., Formayer, H., Hlavinka P., Schaumberger, M., Horáková, V., Možný, M., Žaluda Z., (2010) Simple snow cover model for agrometeorological applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, **150**, 1115-1127.
- Trnka, M., Olesen, J.E., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Eitzinger, J., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rötter, R., Iglesias, A., Orlandini, S., Dubrovský, M., Hlavinka, P., Balek, J.,

- Eckersten, H., Cloppet, E., Calanca, P., Gobin, A., Vučetić, V., Nejedlik, P., Kumar, S., Lalic, B., Mestre, A., Rossi, F., Kozyra, J., Alexandrov, V., Semerádová, D., Žalud, Z., (2011) Agroclimatic conditions in Europe under climate change. *Global Change Biology*, **17**, 2298–2318.
- Tunusluoglu, M., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H., Sonmez, H. (2008) Extraction of potential debris source areas by logistic regression technique: a case study from Barla, Besparmak and Kapi mountains (NW Taurids, Turkey). *Environmental Geology*, **54**, 9–22.
 - Van Den Eeckhaut, M., Vanwalleghe, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., Vandekerckhove, L. (2006) Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: A case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology*, **76**(3-4), 392–410.
 - Van Den Eeckhaut, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Rossi, M., Poesen, J. (2009) Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: An example from the Flemish Ardennes, Belgium. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9**, 507–521.
 - Van Vliet, J., Bregt, A.K., Hagen-Zanker, A., 2011. Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models. *Ecological Modelling*, **222**, 1367–1375.
 - van Westen, C.J. (1993) Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. *ITC Publication No: 15*. International Institute for Aerospace and Earth Resources Survey, Enschede
 - van Westen, C.J. Seijmonsbergen, A.C., Mantovani, F. (1999) Comparing landslide hazard maps. *Natural Hazard*, **20**, 137-158.
 - van Westen, C.J., Rengers, N., Soeters, R. (2003) Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. *Natural Hazards*, **30**, 399–419.
 - van Westen, C.J., Castellanos, E., Kuriakose, S.L. (2008) Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview, *Engineering Geology* **102**, 112-131.
 - van Zuidam, R.A. (1985) Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC). Smits Publishers, The Hague. 442 pp.
 - Varnes, D.J. (1978) Slope movement types and processes. In: *Schuster RL, Krizek RJ* (eds) *Landslides, analysis and control*, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, DC, 11–33.

- Varnes, D.J. & Iaeg Commission On Landslide (1984) Landslide hazard zonation - a review of principles and pratique. UNESCO, Paris 63 pp.
- Venables, W. N. & Ripley, B. D. (2002) Modern Applied Statistics with S, Springer, New York, 2002.
- Vennari, C., Gariano, S. L., Antronico, L., Brunetti, M. T., Iovine, G., Peruccacci, S., Terranova O., Guzzetti f. (2014) Rainfall thresholds for shallow landslide occurrence in Calabria , southern Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **14**, 317–330.
- Vessia, G., Parise, M., Brunetti, M.T., Peruccacci S., Rossi M., Vennari C., Guzzetti F., (2014) Automated reconstruction of rainfall events responsible for shallow landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **14**, 2399–2408.
- Vessia G., Pisano L., Vennari C., Rossi M., Parise M. (2016) Mimic expert judgement through automated procedure for selecting rainfall events responsible for shallow landslide: A statistical approach to validation. *Computers & Geosciences*, **86**, 146–153.
- Vezzani L. (1975) Lithostratigraphic complexes and evidence for tectonic phases in the Molise-Puglia-Lucania Apennines. In Structural Model of Italy. *Maps and explanatory notes C.N.R., Quaderni della Ricerca Scientifica*, **90**, 329-363.
- Vezzani, L., Ghisetti, F., Festa, A., (2004) Carta Geologica del Molise. Scala 1:100.000. S.E.L.C.A. Firenze.
- Wang, L-J., Sawada, K., Moriguchi, S. (2013) Landslide susceptibility analysis with logistic regression model based on FCM sampling strategy. *Computers and Geosciences*, **57**, 81–92.
- Warner, K., Hamza, M., Oliver-Smith, A., Renaud, F., Julca, A. (2010) Climate change, environmental degradation and migration. *Nat. Hazards* **55**, 689–715.
- Wasowski, J., Lamanna, C., Casarano, D. (2010) Influence of land-use change and precipitation patterns on landslide activity in the Daunia Apennines Italy. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, **43**, 1–17
- Wasowski, J., Lagreca, M.D., Lamanna, C. (2014) Land-Use Change and Shallow Landsliding: A Case History from the Apennine Mountains, Italy. In K. Sassa, P. Canuti, Y. Yin (Eds.), *Landslide Science for a Safer Geoenvironment: Vol.1: The International Programme on Landslides (IPL)* (pp. 267–272). Cham: Springer International Publishing.
- Weed, D.L. (2005) Weight of evidence: a review of concept and methods. *Risk Analysis*, **25**, 1545–1557.
- White, I.D., Mottershead, D.N., Harrison, J.J. (1996) *Environmental systems*, 2nd edn. London: Chapman & Hall, 616 pp.

- Wills, C.J. & McCrirk, T.P. (2002) Comparing landslide inventories-the map depends on the method. *Environmental & Engineering Geoscience*, **8**, 279–293.
- Yalcin, a., Reis, S., Aydinoglu, a. C., Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, **85**(3), 274–287.
- Yesilnacar, E. & Topal, T. (2005) Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering Geology*, **79**, 251–266.
- Yilmaz, I. (2009) Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from kat landslides (Tokat-Turkey). *Computers and Geosciences*, **35**(6), 1125–1138.
- Yilmaz, I. (2010) Comparison of landslide susceptibility mapping methodologies for Koyulhisar, Turkey: conditional probability, logistic regression, artificial neural networks, and support vector machine. *Environmental Earth Science*, **61**, 821–836.
- Zezere, J.L. & Rodrigues, M.L. (2002) Rainfall thresholds for landsliding in Lisbon Area (Portugal). In: *Landslides* (Rybar J, Stemberk J, Wagner P, eds). Lisse:A.A. Balkema, 333–338.
- Zezza F., Merenda L., Bruno G., Crescenzi E. & Iovine G. (1994) Condizioni di instabilità e rischio da frana nei comuni dell'Appennino Dauno Pugliese. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, **29**, 77-141.

Ringraziamenti

In queste poche righe vorrei esprimere la mia più sincera gratitudine alle persone che mi sono state vicine sia professionalmente che personalmente durante questi lunghi anni di dottorato.

In primis il mio ringraziamento va alla Prof.ssa Carmen Roskopf, il cui supporto mi ha consentito di sviluppare al meglio questo lavoro.

Un sentito grazie va Prof. Mario Parise e all'Ing. Giovanna Vessia per avermi accolto e aiutato con preziosi suggerimenti e osservazioni, nonché essermi stati vicino anche nei momenti più difficili del mio percorso.

Un sentito e doveroso ringraziamento va al Prof. Pietro Aucelli, il quale soprattutto nel primo periodo del mio percorso di ricerca si è sempre dimostrato estremamente disponibile e aperto al continuo dialogo.

In questo elenco non può mancare il ringraziamento ai vari gruppi di ricerca CNR-IRPI delle sezioni di Bari e Perugia per avermi supportato scientificamente e anche mentalmente. Di questi inoltre vorrei ringraziare il Dott. Melillo per l'aiuto datomi nella definizione della soglia pluviometrica che è parte integrante di questo lavoro, nonché la Dott.ssa Carmela Vennari per il proficuo aiuto nella raccolta di alcuni dati fondamentali.

Inoltre un ringraziamento va al Dott. Ziga Malek, per l'enorme contributo fornitomi nella realizzazione degli scenari futuri di copertura del suolo.

Un sentito grazie anche ai dipendenti del Centro Funzionale Decentrato della Protezione Civile Regione Puglia, per il supporto dato nella raccolta dei dati pluviometrici utili alla realizzazione della soglia pluviometrica.

In particolar modo vorrei ringraziare i colleghi e amici del Laboratorio di Cartografia tematica & Gis del Dipartimento di Bioscienze e territorio, nelle persone di Vito, Vittoria, Gianluigi, Andrea, Vincenz, Francesca, Ettore e Carmine.

Un ringraziamento particolare va ad un mio vecchio Professore che con i suoi utili consigli e con la sua alta moralità mi ha saputo rincorare anche nei momenti più difficili di questo dottorato.

Per concludere grazie alla mia famiglia per i valori che mi hanno continuamente cercato di infondere, per l'assiduo conforto che mi hanno sempre dato. Naturalmente mia moglie Veronica è esclusa dalle dediche e dai ringraziamenti a lei preferisco dedicare la mia vita.